

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos

NOORA MOILANEN

# HIENOKUONAN KÄYTTÖ KEVYTSORAN LISÄAINEENA

Työn valvoja: Prof. Olli Ravaska

Työn ohjaaja: Prof. Pekka Taskinen

<b>Tekijä:</b>	Noora Moilanen	
<b>Diplomityö:</b>	Hienokuonan käyttö kevytsoran lisäaineena	
<b>Päivämäärä:</b>	26.10.2008	<b>Sivumäärä:</b> 118
<b>Professuuri:</b>	Pohjarakennus ja maamekaniikka	<b>Koodi:</b> Rak-50
<b>Valvoja:</b>	Prof. Olli Ravaska	
<b>Ohjaaja:</b>	Prof. Pekka Taskinen	
<b>Avainsanat:</b>	hienokuona, kevytsora, liukoisuustestit, materiaaliominaisuudet	
<p>Tässä diplomityössä tutkittiin sitä, soveltuuko Boliden Harjavalta Oy:n kuparintuotannon poistena syntyvä hienokuona kevytsoran lisäaineeksi. Työn alussa on kuvattu lyhyesti kuparin- ja kevytsoratuotannon vaiheet, kerrottu käytettävistä raaka-aineista sekä hienokuonan ja kevytsoran ominaisuuksista. Tämän jälkeen työssä on kuvattu tehdyt laboratorio-kokeet ja kerrottu kokeiden tulokset.</p> <p>Hienokuonaa sisältävää kevytsoraa tuotettiin erilaisilla hienokuonaosuuksilla maxit Oy Ab:n Kuusankosken kevytsoratehtaalla tehdaskoeajoissa huhti- ja toukokuussa 2008. Tehdaskoeajoista kerättiin 6 näytettä, joissa oli joko 3 %, 5 % tai 8 % hienokuonaa raaka-aineseoksen märkäpainosta. Kaikilla hienokuonaosuuksilla tuotettiin kahdenlaista kevytsoraa, toisessa oli normaali määrä saviöljyä ja toisessa noin puolet normaalista määrästä. Näiden näytteiden avulla tutkittiin erilaisilla laboratoriokokeilla hienokuonan lisäämisen, ja toisaalta saviöljyn määrän vähentämisen, vaikutuksia kevytsoran rakenne-, materiaali- ja liukoisuusominaisuuksiin.</p> <p>Tehdaskoeajoissa kokemukset hienokuonan lisäämisestä prosessiin olivat neutraaleja. Hienokuona vaikutti aluksi tasapainottavan prosessia, mutta vaikutus hävisi koeajojen jatkuessa. Hienokuonan ei kuitenkaan havaittu häiritsevän prosessia.</p> <p>Laboratoriokokeissa hienokuonan ei havaittu merkittävästi parantavan, mutta ei toisaalta huonontavankaan kevytsoran materiaaliominaisuuksia. Saviöljyn määrän laskemisella sitä vastoin oli selvä ominaisuuksia heikentävä vaikutus.</p> <p>Hienokuonan käyttöä kevytsoran lisäaineena ajatellen liukoisuustestit osoittautuivat ratkaiseviksi. Rakennusmateriaaleille ei ole määritetty omia liukoisuusraja-arvoja, joten tässä diplomityössä kevytsoralle sovellettiin pysyvän jätteen kaatopaikalle määritettyjä raja-arvoja. Hienokuonaa sisältävien kevytsoranäytteiden liukoisuutta tutkittiin pääasiassa kaksivaiheisilla ravistelutesteillä. Näissä testeissä arseenin ja molybdeenin liukoisuudet olivat yli raja-arvon.</p> <p>Laboratoriokokeiden perusteella hienokuonan merkitys tuotantoprosessiin ja lopputuotteen materiaaliominaisuuksiin on neutraali. Haitta-aineiden liian suuret liukoisuusarvot kuitenkin estävät hienokuonan käytön kevytsoran lisäaineena sellaisenaan. Hienokuonaa voidaan käyttää lisäaineena vain, jos hienokuonan rakennetta tai kevytsoran tuotantoprosessia pystytään muokkaamaan niin, että haitta-aineet sitoutuvat kevytsoraan liukenemattomaan muotoon.</p>		

<b>Author:</b>	Noora Moilanen	
<b>Thesis:</b>	Flotation tailings as an additive of raw material of LECA	
<b>Date:</b>	26.10.2008	<b>Number of pages:</b> 118
<b>Professorship:</b>	Soil mechanics and foundation engineering	<b>Code:</b> Rak-50
<b>Supervisor:</b>	Prof. Olli Ravaska	
<b>Instructor:</b>	Prof. Pekka Taskinen	
<b>Key Words:</b>	fine slag, copper slag, LECA, leaching tests, material properties	

Fine slag is a waste product of the copper smelting process in Boliden Harjavalta Ltd's copper smelter. The possibility of using fine slag as an additive of raw material of lightweight expanded clay aggregate (LECA) was investigated in this thesis. In the beginning of this thesis, there is a short description of the copper smelting process and the production of LECA, and of the properties of fine slag and LECA. The laboratory tests are described and the results of the tests are presented and summarised.

In the LECA plant of maxit Ltd. at Kuusankoski fine slag was introduced into the LECA production process in plant test runs. In these test runs different amounts of fine slag were mixed with clay, the main raw material of LECA, and fed into the production process. The amount of heavy fuel oil was reduced in some tests to a half of its normal amount. From the test runs six samples were gathered for laboratory analysis. The amount of fine slag in these samples was 3 %, 5 % or 8 % wet basis. The laboratory analysis investigated the effect of fine slag and reduction of heavy fuel oil on the material, structural and leaching properties of LECA.

At the beginning of the plant test runs, it seemed that the fine slag helped the production process by making the process more stable. However by the end of the test the balancing effect had disappeared. Overall, fine slag did not benefit the process though it did not affect it negatively either.

The laboratory analysis showed that fine slag had only a slight effect in the material properties of LECA. The reduction of heavy fuel oil had a much greater, negative effect on the properties.

It was the leaching properties of the samples containing fine slag, which ultimately determined whether fine slag could be used as an additive. The leachability of the samples was tested mainly with a two-stage batch leaching test. The results of these tests indicated that the leaching of arsenic and molybdenum was more than the allowable limit in all the samples containing fine slag.

According to the material tests, fine slag neither improved nor disimproved the properties of the LECA samples containing fine slag. The leaching results, however, preclude the use of fine slag as an additive of LECA. Fine slag may be used as an additive to LECA only if the structure of fine slag or the production process of LECA can be changed so that leaching is within the allowed limit.

## **Alkusanat**

Diplomityöni on tehty Teknillisen korkeakoulun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriolle vuonna 2008. Diplomityöni on tehty osana Boliden Harjavalta Oy:n ja Outotec Research Oy:n KUNI-projektia yhteistyössä maxit Oy Ab:n kanssa.

Kiitän professori Olli Ravaskaa työni valvonnasta ja professori Pekka Taskista työni ohjauksesta.

Kiitos Boliden Harjavalta Oy:lle diplomityöni rahoituksesta ja erityisesti kiitos Esa Peuraniemelle, joka toimi Boliden Harjavalta Oy:n yhteyshenkilönä käytännön asioissa.

maxit Oy Ab:lle kiitos osallistumisesta projektiin. maxit Oy Ab:stä haluan erityisesti kiittää Kuusankosken Leca-soratehtaan päällikköä Jari Mukkulaa, ympäristövastaava Satu Rättyä ja laboratorioinsinööri Mikael Raitaa yhteistyöstä.

Kiitos Outotec Research Oy:n laboratoriohenkilökunnalle työhöni liittyneiden laboratoriokokeiden suorittamisesta sekä erityisesti TkL Heikki Eerolalle, joka toimi laboratorion yhteyshenkilönä.

Kiitos Geomap Oy:n Vesa Oksaselle avusta diplomityön aiheen etsinnässä ja työn alkujärjestelyissä.

Kiitos Eliselle diplomityöhön liittyneistä arvokkaista käytännön neuvoista ja Niamhille avusta englannin kielen kanssa.

Lopuksi vielä suuri kiitos Tuomolle tuesta ja kannustuksesta sekä kiitos vanhemmilleni, jotka ovat aina jaksaneet kannustaa minua ja olla kiinnostuneita tekemisistäni.

Espoossa 26.10.2008

Noora Moilanen

## Sisällysluettelo

<b>TIIVISTELMÄ.....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>ALKUSANAT.....</b>	<b>4</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO.....</b>	<b>5</b>
<b>KÄSITTEET JA TERMIT.....</b>	<b>8</b>
<b>1. JOHDANTO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. BOLIDEN HARJAVALTA OY:N HIENOKUONA .....</b>	<b>12</b>
2.1. PERUSTIETOJA BOLIDEN HARJAVALTA OY:N TUOTANNOSTA.....	12
2.2. KUPARIN VALMISTUKSEN YLEISKUVAUS.....	12
2.3. PROSESSIKAASUJEN KÄSITTELY .....	15
2.4. HIENOKUONAN SYNTYMINEN .....	15
2.4.1. Kuonan muodostuminen liekkisulatusuunissa.....	15
2.4.2. Konvertoinnista saatava kuona.....	16
2.4.3. Kuonien käsittely hienokuonaksi.....	17
2.5. HIENOKUONAN OMINAISUUDET .....	20
<b>3. KEVYTSORA.....</b>	<b>24</b>
3.1. PERUSTIETOJA MAXIT OY AB:N TUOTANNOSTA .....	24
3.2. MAXIT OY AB:N LECA-SORAN VALMISTUS .....	25
3.2.1. Raaka-aineet.....	25
3.2.2. Valmistusprosessi.....	27
3.2.3. Paisumisprosessi .....	30
3.2.4. Polttoaineet .....	31
3.3. KEVYTSORAN OMINAISUUDET .....	32
<b>4. TEHDASMITTAKAAVAN KOEAJOT MAXIT OY AB:N KEVYTSORA- TEHTAALLA KUUSANKOSKELLA .....</b>	<b>33</b>
<b>5. LABORATORIOTUTKIMUKSET .....</b>	<b>35</b>
5.1. KOKEET JA TUTKITTAVAT NÄYTTEET .....	35

5.2.	MINERALOGIA- JA RAKENNETARKASTELUT .....	36
5.2.1.	<i>Röntgendiffraktometri</i> .....	36
5.2.2.	<i>Optinen mikroskooppi</i> .....	37
5.2.3.	<i>Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM)</i> .....	37
5.2.4.	<i>Näytehien valmistus mikroskopointia varten</i> .....	38
5.3.	KIINTOTIHEYD .....	38
5.4.	HUOKOISUUS.....	39
5.5.	MURSKAUTUVUUS .....	39
5.6.	YKSITTÄISEN RAKEEN PURISTUSMURTOLUJUUS .....	40
5.7.	RAKEIDEN HIERTYMINEN .....	42
5.8.	VEDEN KAPILLAARINEN NOUSUKORKEUS.....	43
5.9.	LIUKOISUUS .....	48
5.9.1.	<i>Kaksivaiheinen ravistelutesti</i> .....	48
5.9.2.	<i>Läpivirtaustesti ylöspäin</i> .....	51
5.9.3.	<i>pH-staattinen liukoisuustesti</i> .....	54
6.	<b>MITTAUSDATA JA MUUT TUTKIMUSTIEDOT .....</b>	<b>59</b>
6.1.	MAXIT OY AB:N JATKUVATOIMINEN PROSESSIMITTAUS.....	59
6.2.	PÄÄSTÖMITTAUKSET MAXIT OY AB:N KUUSANKOSKEN TEHTAALLA .....	59
6.3.	KEVYTSORAN LÄMMÖNJOHTAVUUDEN TUTKIMUKSET .....	59
7.	<b>LABORATORIOTUTKIMUSTEN TULOKSET .....</b>	<b>61</b>
7.1.	MINERALOGIA- JA RAKENNETARKASTELUT .....	61
7.1.1.	<i>Röntgendiffraktometria</i> .....	61
7.1.2.	<i>Optiset mikroskooppikuvat</i> .....	61
7.1.3.	<i>SEM-kuvat</i> .....	61
7.2.	KIINTOTIHEYD .....	62
7.3.	HUOKOISUUS.....	62
7.4.	MURSKAUTUVUUS .....	63
7.5.	YKSITTÄISEN RAKEEN PURISTUSMURTOLUJUUS .....	63
7.6.	RAKEIDEN HIERTYMINEN .....	64
7.7.	VEDEN KAPILLAARINEN NOUSUKORKEUS.....	64
7.8.	LIUKOISUUS .....	65
7.8.1.	<i>Kaksivaiheinen ravistelutesti</i> .....	65
7.8.2.	<i>Läpivirtaustesti ylöspäin</i> .....	65

7.8.3.	<i>pH-staattinen liukoisuuskoe</i> .....	65
<b>8.</b>	<b>MUUT TUTKIMUSTULOKSET</b> .....	<b>66</b>
8.1.	IRTOKUIVATIHEYS .....	66
8.2.	SAVUKAASUT .....	66
8.3.	LÄMMÖNJOHTAVUUS .....	68
<b>9.</b>	<b>AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET</b> .....	<b>69</b>
9.1.	KEVYTSORALLA TEHDYT LIUKOISUUSTESTIT .....	69
9.2.	HIENOKUONALLA TEHDYT LIUKOISUUSTESTIT .....	70
9.3.	MAXIT OY AB:N KUUSANKOSKEN TEHTAALLA TEHDYT PÄÄSTÖMITTAUKSET .....	71
<b>10.</b>	<b>TULOSTEN ANALYSOINTI</b> .....	<b>73</b>
10.1.	MINERALOGIA- JA RAKENNETARKASTELUT .....	73
10.1.1.	<i>Röntgendiffraktometria</i> .....	73
10.1.2.	<i>Optiset mikroskooppikuvat</i> .....	73
10.1.3.	<i>SEM-kuvat</i> .....	74
10.2.	KIINTOTIHEYS .....	74
10.3.	HUOKOISUUS .....	75
10.4.	MURSKAUTUVUUS .....	75
10.5.	YKSITTÄISEN RAKEEN PURISTUSMURTOLUJUUS .....	75
10.6.	RAKEIDEN HIERTYMINEN .....	77
10.7.	VEDEN KAPILLAARINEN NOUSUKORKEUS .....	78
10.8.	LIUKOISUUS .....	78
10.8.1.	<i>Kaksivaiheinen ravistelutesti</i> .....	78
10.8.2.	<i>Läpivirtaustesti ylöspäin</i> .....	79
10.8.3.	<i>pH-staattinen liukoisuustesti</i> .....	80
10.9.	IRTOKUIVATIHEYS .....	81
10.10.	LÄMMÖNJOHTAVUUS .....	82
10.11.	SAVUKAASUT .....	83
<b>11.</b>	<b>YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>85</b>
	<b>LÄHDELUETTELO</b> .....	<b>90</b>
	<b>LIITTEET</b> .....	<b>94</b>

## Käsitteet ja termit

$A$	männän pinta-ala murskautuvuustestissä, $\text{mm}^2$
$A$	hapon kulutus määrätyn pH-arvon saavuttamiseksi, mol $\text{H}^+$ /kg kuiva-ainetta
$A_2$	liennut aine L/S-suhteessa 2, mg/kg kuiva-ainetta
$A_{2-10}$	liunneen aineen kumulatiivinen määrä L/S-suhteessa 10, mg/kg kuiva-ainetta
$B$	emäksen kulutus määrätyn pH-arvon saavuttamiseksi, mol $\text{OH}^-$ /kg kuiva-ainetta
$C_a$	murskautumiskestävyys, $\text{N/mm}^2$
$C_A$	happoliuoksen konsentraatio, mol/l
$C_B$	emäsluoksen konsentraatio, mol/l
$c_i$	liunneen aineen konsentraatio fraktion $i$ suodoksessa, mg/l
$C_2$	konsentraatio L/S-suhteen 2 suodoksessa, mg/l
$C_8$	konsentraatio L/S-suhteen 8 suodoksessa, mg/l
$d_{ka}$	rakeen halkaisijan keskiarvo, mm
$d_t$	putken sisähalkaisija, m
$d_{10}$	10 % läpäisyarvoa vastaava seulakoko, mm
$d_{50}$	50 % läpäisyarvoa vastaava seulakoko, mm
$d_{60}$	60 % läpäisyarvoa vastaava seulakoko, mm
$F$	puristusvoima murskautuvuustestissä, N
$F_{12}$	halkaisijaltaan 12 mm rakeen murtolujuutta vastaamaan muutettu murtolujuusarvo kylmäpuristustestissä, kp
$F_{ka}$	murtovoimien keskiarvo kylmäpuristuskokeessa, kp
$hi$	korkeusero vapaan veden pinnan ja yksittäisen kerroksen keskikohdan välillä veden kapillaarisessa nousukokeessa, mm
$i$	fraktion numero
$k$	vedenläpäisevyysarvo, m/s
$L$	männästä aiheutuva voima murskautuvuustestissä, N
$L_2$	ionivaihdetun veden tilavuus L/S-suhteessa 2, l
$L_8$	lisätyn ionivaihdetun veden tilavuus L/S-suhteessa 8, l
$m$	kolonnissa olevan näytteen kostea massa, kg



$m_0$	kolonnissa olevan näytteen kuiva massa, kg
$MC$	näytteen kosteusprosentti, %
$M_D$	näytteen kuivapaino, kg
$M_d, m_d$	näytteen kuivapaino, g
$M_{hyg}$	kostean materiaalin massa veden kapillaarisessa nousukokeessa, g
$M_{hygt}$	kuivan materiaalin massa veden kapillaarisessa nousukokeessa, g
$m_r$	kuivaamattoman näytteen massa, g
$M_t$	kokonaismassa ajan $t$ jälkeen veden lisäyksestä veden kapillaarisessa nousukokeessa, g
$M_w$	näytteen massa luonnonkosteana, g
$M_l$	astian ja tyhjän putken massa veden kapillaarisessa nousukokeessa, g
$M_2$	astian, putken ja näytteen massa veden kapillaarisessa nousukokeessa, g
$M_3$	kostean materiaalin massa veden kapillaarisessa nousukokeessa, kg
$M_4$	kuivan materiaalin massa veden kapillaarisessa nousukokeessa, kg
$M_5$	kokonaismassa 5 min kuluttua veden lisäyksestä veden kapillaarisessa nousukokeessa, g
$n$	huokoisuus, %
$?$	laskennallinen irtotiheys, kg/m <sup>3</sup>
$?_{kuiva}$	näytteen tiivistetty irtokuivatiheys, kg/m <sup>3</sup>
$?_s$	kiintotiheys, kg/m <sup>3</sup>
$TOC$	kokonaisorgaaninen hiili (total organic carbon)
$U_i$	liuennan aineen määrä fraktion $i$ suodoksessa, mg/kg kuiva-aine
$W_{ct}$	absorboitunut ja imeytynyt vesi näytteessä ajan $t$ jälkeen, g
$w_{dr}$	näytteen kuivaosuus näytteen koko massasta, %
$W_{hi}$	kerroksen $i$ vesipitoisuus, massa-%
$W_{hyg}$	hygroskooppisen veden absorptiokyky, %
$V$	putken laskettu tilavuus, m <sup>3</sup>

$V$	nesteen kokonaismäärä, sisältäen näytteen kosteuden, ionivaihdetun veden ja happo-/emäslisäyksen, ml
$V_i$	fraktion i suodoksen tilavuus, l
$V_A$	hapon määrä, ml
$V_B$	emäksen määrä, ml
$V_{demin}$	ionivaihdetun veden määrä, ml
$VE_1$	ensimmäisen vaiheen suodoksen tilavuus, l
$V_L$	liuottimen määrä, sisältää ionivaihdetun veden ja hapon/emäksen, ml
$V_{L/S9}$	ionivaihdetun veden määrä, jotta L/S-suhde olisi 9, ml

## 1. Johdanto

Boliden Harjavalta Oy valmistaa sulfidirikasteista liekkisulatusmenetelmällä kuparia. Sulattotoiminnassa syntyy poisteena rautaoksidipitoista kuonaa, jota kutsutaan hienokuonaksi.

Boliden Harjavalta Oy:n sulaton nimelliskapasiteetti on 160 000 tonnia kuparia vuodessa, jolloin hienokuonaa syntyy noin 350 000 tonnia vuodessa. Tällä hetkellä kuonalla ei ole kannattavaa hyötykäyttökohdetta, joten hienokuona läjitetään jätteenä sulaton vieressä oleville teollisuuskaatopaikoille. Vuodessa syntyvän hienokuonan suuren määrän vuoksi uusia läjitysalueita joudutaan etsimään jatkuvasti, ja koska tehtaan lähialueet ovat jo käytössä, pitää uusia alueita etsiä kauempaa. Läjitysalueiden siirtyessä kauemmaksi tehtaasta nousevat kuonan läjituskustannukset.

Boliden Harjavalta Oy teettää tutkimus- ja kehitystyötä kumppanuussopimuksen perusteella Outotec Research Oy:llä. Outotecilla ja Bolidenillä on meneillään kolme vuotta kestävä projekti, jossa pyritään löytämään kuparin ja nikkelin tuotannossa syntyville kuonille kannattavaa hyötykäyttöä. Projektin nimi on Harjavallan tehtaan kupari- ja nikkeli-kuonien tutkimus ja tuotekehitysprojekti, eli KUNI. Tämä diplomityö tehdään osana KUNI-projektia.

Diplomityöni tarkoituksena on tutkia voidaanko hienokuonaa käyttää kevytsoran valmistuksessa raaka-aineen lisäaineena. Suomessa kevytsoraa valmistetaan vain yhdessä paikassa, maxit Oy Ab:n Kuusankosken tehtaalla. Tässä diplomityössä selvitetään, miten hienokuonan lisäys pääraaka-aineena käytettävään saveen vaikuttaa kevytsoran ominaisuuksiin. Myös hienokuonaa sisältävän kevytsoran liukoisuusominaisuuksia tutkitaan, sillä aineiden liukoisuudet käytännössä määräävät, voiko hienokuonaa käyttää lisäaineena vai ei.

## **2. Boliden Harjavalta Oy:n hienokuona**

### **2.1. Perustietoja Boliden Harjavalta Oy:n tuotannosta**

Boliden Harjavalta Oy on osa kansainvälistä Boliden-yhtymää, joka on yksi Euroopan johtavista kaivos- ja sulattoyhtiöistä. Bolidenillä on toimipisteitä Ruotsin, Suomen ja Norjan lisäksi myös Irlannissa ja Alankomaissa. Bolidenin päätuotteet ovat sinkki, kupari, lyijy, kulta ja hopea. (Boliden Oy, 2008)

Boliden Harjavalta Oy valmistaa kuparia. Se omistaa kaksi tuotantolaitosta: Harjavallan sulaton ja Porin kuparielektrolyysin. Sulatossa valmistetaan kuparianodeja, joiden kuparipitoisuus on 99,3 %. Kuparielektrolyysissä kuparianodi jatkojalostetaan kuparikatodeiksi, jolloin lopputuotteen kuparipitoisuus saadaan nostettua 99,998 %:iin. Sulaton nimelliskapasiteetti on 160 000 tonnia kuparia vuodessa. (Boliden Oy, 2008)

Hienokuona on kuparisulaton poistetta. Sulatusprosessin eri vaiheissa kuparirikasteen rauta ja sivukivi sidotaan hiekan avulla kuonaan. Kuonaan sitoutuu myös jonkin verran talteen haluttavaa kuparia. Aikaisemmin Harjavallassa kupari erotettiin kuonasta sähköuunissa, mutta vuodesta 1966 lähtien kuonat on käsitelty rikastusteknisesti, jäähdyttämällä ja vaahdottamalla. Hienokuona on siis vaahdotuksesta syntyvä poiste. Se muistuttaa lähinnä murskattua ja hienonnettua luonnonkiveä ja se sisältää pääasiassa pii- ja rautaoksideja. Hienokuonaa syntyy noin 350 000 tonnia vuodessa ja tällä hetkellä se kaikki läjitetään sulaton lähellä oleville suurille läjitysalueille.

### **2.2. Kuparin valmistuksen yleiskuvaus**

Kuparin valmistuksen perusraaka-aineena käytetään kuparirikastetta. Kupari esiintyy maakuoressa yleisimmin kupari-rauta-sulfidi- ja kupari-sulfidimineraaleina (esimerkiksi kuparikiisu  $\text{CuFeS}_2$ , borniitti  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ , kalkosiitti  $\text{Cu}_2\text{S}$ ). Näiden mineraalien määrä louhittavassa malmissa on kuitenkin vain 0,5–2 %. Kaivoksilla malmi rikastetaan erilaisten prosessien avulla, yleensä vaahdottamalla, kuparirikasteeksi, joka sisältää noin 25–30 % kuparia. Malmi rikastetaan, jotta varsinaisessa kuparinvalmistusprosessissa sivukiven sulattamiseen kuluisi mahdollisimman vähän energiaa. (Biswas & Davenport, 1994)

Kuparin valmistuksessa käytettävät rikasteet tulevat Harjavaltaan kaivoksista ympäri maailmaa. Rikasteita tuodaan mm. Etelä-Amerikasta, Kauko-Idästä ja Euroopasta. Suomesta tulevan raaka-aineen osuus on noin 10 % tuotannosta. Harjavallan sulatto käyttää rikasteen lisäksi raaka-aineena myös jonkin verran sekundäärejä, kuten kuparia ja jalometalleja sisältäviä romuja ja sakkoja. Näiden kierrätysmateriaalien osuus koko raaka-ainemäärästä oli vuonna 2006 noin 3 %. (Boliden Oy, 2008)

Sulatolle saapuva kuparirikaste saattaa vaihdella laadultaan ja kuparipitoisuudeltaan. Tämän vuoksi rikasteiden kemiallinen ja fysikaalinen laatu tarkastetaan näytteenotto- ja analyysimenetelmillä. (Boliden Oy, 2008) Laaduntarkastuksen jälkeen rikasteista ja sekundääreistä muodostetaan luonnonhiekan (n. 90 %  $\text{SiO}_2$ ) kanssa seos, joka homogenoidaan petauslaitoksella (Boliden Oy, 2008; Kytö & Vartiainen, 1993a). Prosessihallinnan helpottamiseksi ja lopputuotteen laadun takaamiseksi seoksesta pyritään tekemään aina samanlaista, vaikka rikasteiden laatu vaihtelee (Junnikkala, 2008). Syöttöseos kuivataan höyrykuivaimilla, jolloin sen kosteus laskee noin 8 %:sta 0,2 %:iin. (Boliden Oy, 2008)

Kuivattu syöttöseos kuljetetaan liekkisulatusuunin yläpuolella sijaitsevaan kuivarikaste-siiloon, josta syöttöseos syötetään liekkisulatusuuniin. Rikastepoltin sekoittaa syöttöseoksen happirikastetun ilman kanssa. Polttoilman happirikastusaste on 50–90 %. Liekkisulatusuuniin menevän syötteen määrää ohjataan LIW-laitteistolla (Loss-In-Weight). (Boliden Oy, 2008)

Liekkisulatusuunissa, jossa lämpötila on noin 1250 °C, happi reagoi nopeasti syöttöseoksen sulfidimineraalipartikkelien kanssa. Kun rauta ja rikki hapettuvat, syntyy runsaasti lämpöä, joka sulattaa syöttöseoksen kiinteät partikkelit. Hapetusreaktiossa syntyy niin paljon lämpöä, että prosessi tuottaa itse kaiken tarvitsemansa energian. Fossiilisia polttoaineita tarvitaan vain polttouunin lämpötilan kontrollointiin. (Biswas & Davenport, 1994)

Liekkisulatusuunissa muodostunut sula sulfidiseos, eli kuparikivi, sisältää noin 67 % kuparia. Sulapartikkelit putoavat uunin alaosaan, jossa kuparikivi- ja kuonakerrokset erottuvat toisistaan. Liekkisulatusuunista kuparikivi johdetaan edelleen käsiteltäväksi

Peirce-Smith-konverttereihin. Syntynyt kuona kerätään patoihin ja kuljetetaan jäähdytysalueelle jäähtymään. (Boliden Oy, 2008)

Kuparikivi konvertoidaan raaka-kupariksi Peirce-Smith-konverttereissa (Boliden Oy, 2008). Konverttereissa sulan sekaan puhalletaan ilmaa ja hiekkaa. Konvertoinnissa seoksessa hapettuu ensin rauta ja sen jälkeen rikki. Hapettuminen hidastuu, kun hapetettavaa ainetta on seoksessa jäljellä alle 1 %. Konvertointi lopetetaan siinä vaiheessa, kun kuparioksideja alkaa ilmestyä seokseen. Konvertointijakso kestää yleensä 8–12 tuntia. (Biswas & Davenport, 1994) Konvertoitu raakakupari siirretään anodiuuneille ja syntynyt kuona kuljetetaan jäähtymään jäähdytysalueelle (Boliden Oy, 2008).

Harjavallan laitoksella konverttereita on neljä kappaletta, joista kolme on jatkuvasti käytössä. Näin konverttereja voidaan huoltaa vuorotellen. (Boliden Oy, 2008) Konvertointiprosessi ei vaadi ulkopuolista energiaa, sillä hapettumisreaktiot tuottavat kaiken prosessissa tarvittavan lämmön (Biswas & Davenport, 1994). Itse asiassa lämpöä syntyy niin paljon, että konverttereita joudutaan jäähdyttämään lisäämällä sulaan seokseen kuparipitoisia, kylmiä materiaaleja ja kierrätysmateriaaleja (Boliden Oy, 2008).

Konvertoidun raaka-kuparin kuparipitoisuus on noin 99 %. Anodiuuneissa raaka-kuparin puhdistusta jatketaan niin, että saatu kuparianodi sisältää noin 99,3 % kuparia. Anodiuuneissa konvergoidusta raaka-kuparista poistetaan rikkiä hapettamalla kuparisulaa ilmalla. Käsittelyn jälkeen rikkipitoisuus kuparissa on alle 0,01 %. Hapetuksessa kuparisulaan liuennut happi poistetaan puhaltamalla sulaan propaania. Tämän jälkeen kuparianodit valetaan automaattisen valupöydän avulla. Valun jälkeen kuparianodit jäähdytetään ja kuljetetaan junavaunuissa Poriin kuparielektrolyysiin. (Boliden Oy, 2008)

Kuparielektrolyysin lopputuloksena saadaan kuparikatodeja, joiden kuparipitoisuus on noin 99,998 %. Kuparikatodien lisäksi elektrolyysissä syntyy useita oheistuotteita, kuten kultaa, hopeaa, platina-palladium-rikastetta ja nikkelisulfaattia. Näitä tuotteita valmistetaan kuparin tuotannon yhteydessä, sillä kaivoksista saatu kuparirikaste sisältää jokseenkin merkittävän määrän näitä jalometalleja. (Boliden Oy, 2008)

### 2.3. Prosessikaasujen käsittely

Kuparivalmistuksessa syntyvä rikkidioksidipitoiset prosessikaasut ohjataan jätelämpökattilan kautta sähkösuodattimeen. Kaasuista erotettu lentopöly syötetään takaisin liekkisulatusuuniin. Kaasujen rikkidioksidi johdetaan rikkihappotehtaille, joissa siitä tehdään erilaisia rikkituotteita, kuten nestemäistä rikkidioksidia ja rikkihappoa. Kaasujen sisältämä energia saadaan talteen höyrynä ja sitä käytetään tehdasalueella lämmityksiin ja osa lämmöstä ohjataan myös kaukolämmön tuotantoon. (Boliden Oy, 2008)

### 2.4. Hienokuonan syntyminen

#### 2.4.1. Kuonan muodostuminen liekkisulatusuunissa

Liekkisulatusuuni koostuu kolmesta osasta, reaktiokuilusta, alauunista ja nousukuilusta. Reaktiokuilussa kuilun yläpäästä syötetty syöttöseos reagoi hapen kanssa ja sulaa täysin tai osittain. Kuparirikasteen sisältämä rauta hapettuu rautaoksidiksi muodostaen sivukiven silikaattien ja oksidien sekä hiekan kanssa sulan kuonan. Kupari rikastuu sulaksi kuparikiveksi ( $\text{Cu}_2\text{S}-\text{FeS}$  -seos). Kuonaan kuparia sitoutuu kuparioksidina ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ). Uuniin syötettävän ilman happikertoimella, eli hapen määrällä rikastetonnia kohti, säädetään kuparikiven kuparipitoisuutta. (Kytö & Vartiainen, 1993a)

Rikasteen matka reaktiokuilusta alauuniin kestää noin 2-4 sekuntia. Alauunin tehtävinä on toimia syntyneiden reaktiotuotteiden kokoamispaikkana, homogenisointireaktorina ja puskurivarastona. Reaktiokuilussa syntyneet sulat ja puolisolat reaktiotuotteet erottuvat alauunissa kaasufaasista ja painuvat uunin pohjalle. Kuparikivi on tiheydeltään painavampaa kuin kuona, joten kuparikivi muodostuu alimmaksi kerrokseksi ja kuona sen päälle. Näiden kerrosten paksuus on tyypillisesti muutama kymmenen senttimetriä. Kuonan lämpötila on 1250–1350 °C ja kuparikiven lämpötila noin 50 °C matalampi. Uuniin syötettävän ilman happirikastuksella säädetään kiven ja kuonan lämpötiloja. (Kytö & Vartiainen, 1993a)

Alauunissa, kuonakerroksen pinnalla, reaktiokuilusta tulleet tuotteet jatkavat keskinäisiä reaktioitaan. Reaktiokuilussa syntynyt magnetiitti reagoi alihapettuneen  $\text{FeS}$ :n kanssa muodostaen rikkidioksidia ja rautaoksidia. Tämä rautaoksidi yhdessä reaktiokuilussa

syntyneen rautaoksidisulan, sivukiven silikaattisen aineksen ja hiekan kanssa muodostavat fajaliittisen kuonan. (Kytö & Vartiainen, 1993a)

Sula kuparikivi ja kuona viipyvät alauunissa muutaman tunnin. Kuparikivi ja kuona lasketaan uunista patoihin omista laskurei'istään. Kuparikivi kuljetetaan padoissa konvertoitavaksi Peirce-Smith -konverttereihin ja kuona jäähtymään jäähdytysalueelle. Reaktioissa syntyneet rikkidioksidipitoiset kaasut johdetaan nousukuilua pitkin jäte- lämpökattilaan. (Kytö & Vartiainen, 1993a)

#### **2.4.2. Konvertoinnista saatava kuona**

Harjavallassa liekkisulatusuunista tuotetaan ns. rikasta kiveä, jossa on noin 66 % kuparia, 10 % rautaa ja 21 % rikkiä. Saatua kuparikiveä rikastetaan Peirce-Smith -konverttereissa. Konverttereissa kuparikiven sisältämä rauta ja rikki hapetetaan pois ja epäpuhtauksia vähennetään puhaltamalla konverttereihin happirikastettua ilmaa. Konvertointi tehdään kahdessa vaiheessa, kuona- ja rikkaaksipuhalluksessa. (Kytö & Vartiainen, 1993b)

Kuonapuhalluksessa rauta hapetetaan ja siirretään kuonaan hiekan avulla. Kuonapuhalluksen alussa konvertteriin panostetaan kuparikiveä, lisätään hiekkaa ja suoritetaan ensimmäinen puhallusvaihe. Tämän jälkeen kuona kaadetaan konvertterista jäähdytys-patoihin ja konvertteriin panostetaan lisää kiveä ja hiekkaa ja suoritetaan toinen puhallusvaihe. Puhallusvaiheita on useita, yleensä 3. Hiekkalisäyksessä pyritään yleensä Fe/SiO<sub>2</sub> -suhteessa välille 1,8–2,0, sillä tällä välillä kuonasta tulee sopivan juoksevaa. Liian suuri piidioksidimäärä voi aiheuttaa hankaluuksia kuonan jatkokäsittelyssä. Se myös kasvattaa kuonan viskositeettia, joka aiheuttaa mekaanisia kuparihäviöitä kuonaan. (Kytö & Vartiainen, 1993b)

Kuonapuhallus kolmessa vaiheessa kestää noin 3 tuntia ja sen tuotteena saadaan ns. muuttokiveä (Cu<sub>2</sub>S). Muuttokivessä on rautaa alle 1 %. Muuttokiven rikki hapetetaan rikkidioksidiksi rikkaaksipuhalluksessa, joka myös kestää noin 3 tuntia. Nyt osa kuparista hapettuu kuparioksidiksi, josta osa kuitenkin reagoi kuparisulfidin kanssa pelkistyen kupariksi. Rikkaaksipuhalluksesta saadaan blister- eli raakakuparia, joka johdetaan eteenpäin prosessissa anodiuuneille. Raakakuparissa on 0,02–0,1 % rikkiä ja 0,2–0,8 % happea. Rikkaaksipuhalluksessa syntyy muuttokiven pienen rautapitoisuuden



vuoksi vain vähän kuonaa, joten se jätetään konvertteriin odottamaan seuraavaa kuparikiven panostusta ja kuonapuhallusvaihetta. (Kytö & Vartiainen, 1993b)

Konvertoinnin hapetusreaktiot ovat voimakkaan eksotermisiä ja tämän vuoksi konverttereita pitää jäähdyttää. Jäähdyttämisessä käytetään kuparipitoisia, kylmiä romuja, kuten elektrolyysistä tullutta anodiromuja sekä kuonarikastuksen yhteydessä murskattuja kivilinssejä. Kuparipitoiset romut voivat sisältää komponentteja, jotka nostavat kuonan sinkki-, lyijy- ja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -pitoisuutta. (Kytö & Vartiainen, 1993b)

Konvertoinnissa syntyvän kuonan määrään vaikuttaa liekkisulatusuunista saadun kuparikiven kuparipitoisuus. Mitä korkeampi kuparipitoisuus on sitä lyhyempi on konvertointiaika ja sitä vähemmän kuonaa muodostuu. Konvertterikuona ei sisällä kuparirikasteen sivukiven kuonakomponentteja ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  jne.), joten se on puhtaammin rautasilikaattikuonaa (ferrosilikaattia) kuin liekkisulatusuunista saatava kuona. Konvertterikuonat ovat kuitenkin epähomogeenisempiä kuin liekkisulatusuunin kuonat, sillä kuonan koostumus ja laatu riippuvat pitkälti yksittäisistä konvertointitapahtumista. Konvertterikuonissa kupari on lähinnä oksidisena, mutta kokonaiskuparista suuri osa on kuonan mukaan joutuneissa kivipartikkeleissa. (Kytö & Vartiainen, 1993b) Konvertterikuonien kuparipitoisuus on n. 5 % ja magnetiittipitoisuus 15-30 % (Kytö & Vartiainen, 1993a).

#### ***2.4.3. Kuonien käsittely hienokuonaksi***

Liekkisulatusuunissa ja konverttereissa kuonaan sitoutuu osa rikasteen kuparista. Kuonarikastamolla kuonista pyritään ottamaan talteen kaikki mahdollinen kupari. Harjavallassa noin  $\frac{3}{4}$  käsiteltävistä kuonista tulee liekkisulatusuunista ja  $\frac{1}{4}$  Peirce-Smith-konverttereista (Kiviö, 2006).

Liekkisulatusuunissa ja konverttereissa syntynyt kuona kerätään omiin jäähdytyspatoihinsa. Patoihin mahtuu 30–35 tonnia kuonaa (Kiviö, 2006). Padat kuljetetaan kuonatruckeilla jäähdytysalueelle, jossa patoja jäähdytetään vesisuihkulla. Syntyvän vesihöyryn vuoksi aluetta kutsutaan Harjavallassa sademetsäksi.

Harjavallassa käytettävä jäähdytysmenetelmä on kanadalaisen sulattoyhtiö Norandan (nykyään Xstrata) kehittämä. Menetelmällä kuona jäähtyy hitaasti, jolloin suurin osa kuonakomponenteista ehtii kiteytyä. Mikäli kuona jäähdytettäisiin nopeasti, jakautuisi kupari koko kuonamatriisiin pienenä pirotteena, joita on vaikea saada talteen vaahdottamalla. Hitaassa jäähdytyksessä kuonasta alkaa ensin kiteytyä magnetiitti ja sen jälkeen fajaliitti ja välilasi. Viimeisenä jähmettyvät Cu-Fe-sulfidit ja metallinen kupari. Mitä pidempään jäähtyminen kestää sitä kauemmin kuparipartikkeleilla on aikaa kasvaa suuremmiksi, mikä helpottaa niiden erottumista vaahdotuksessa. (Kytö & Vartiainen, 1993a)

Sula kuona jäähtyy nopeimmin padan pinnalla ja reunoilla ja hitaimmin padan keskellä, tämän vuoksi kuparia saadaan eniten talteen padan keskellä kiteytyneestä kuonasta. (Kiviö, 2006) Kuonan joukkoon joutunut kuparikivi painuu jäähdytyksessä padan pohjalle ja muodostaa sinne yhtenäisen linssin. Kivilinssi erottuu kuonasta patojen kaadon yhteydessä. (Kytö & Vartiainen, 1993a)

Kuonapatoja jäähdytetään noin 48 tuntia, jonka jälkeen padoissa ei ole enää sulaa materiaalia (Boliden Oy, 2008). Jäähtynyt kuona kipataan padoista maahan kaato-alueella, jolloin kuonamassa hajoaa erikokoisiksi rakeiksi (Junnikkala, 2008; Miikkulainen, 2008). Konvertterikuonista erottuu kaadettaessa kivilinssi, joka kerätään talteen ja toimitetaan takaisin Pierce-Smith -konverttereihin. Muu paloihin hajonnut kuona kuljetetaan hihnakuljettimella rikastamolle, jossa kuonapalat seulotaan kolmeen ryhmään, lohkareisiin (80–300 mm), paloihin (40–80 mm) ja hienoainekseen (<40 mm). (Kiviö, 2006; Kytö & Vartiainen, 1993a; Miikkulainen, 2008). Seulonnan jälkeen kuona jauhetaan pyörivissä myllyissä vaahdotusprosessia varten (Junnikkala, 2008; Miikkulainen, 2008).

Harjavallan tehtaalla jauhusmyllyjä on kaksi paria. Isompaan lohkaremyllypariin menevät lohkareet ja hienojakoinen kuona, pienempään palamyllypariin isompien myllyjen murske ja kuonapalat. Liekkisulatusuunista ja konvertoinnista saadut kuonat pidetään erillään sekä jäähdytysalueella että kippausalueella. Vasta jauhatuksessa kuonat sekoittuvat keskenään. (Junnikkala, 2008; Miikkulainen, 2008)

Vaahdotusprosessissa kuonaan jääneet kupari- ja kuparisulfidipartikkelit erotetaan muusta kuonasta. Murskaamalla saatu hienoaines sekoitetaan veteen ja syötetään vaahdotuskennoon. Vaahdotuskennossa seokseen lisätään vaahdotusöljyä ja kokoojana toimivaa ksantaattia, joka muuttaa kuparimineraalit hydrofobisiksi kun muut aineet jäävät hydrofiilisiksi. Kennon pohjalta seokseen puhalletaan ilmaa, jolloin kuparimineraalit tarttuvat ilmakupliin ja nousevat lietteen pinnalle. Vaahdon pinnalta kuparimineraalit otetaan talteen. Muu materiaali jää lietteenä veteen sekoittuneeksi. (Biswas & Davenport, 1994; Kiviö, 2006)

Vaahdotusprosessin tarkoituksena on saada kuonasta mahdollisimman paljon kuparia talteen. Harjavallassa vaahdotuskennoja on useita. Kuonaliete kerrataan ja jokaisessa kennossa kuona käy läpi saman vaahdotusprosessin. Viimeisestä vaahdotuskennosta jäljelle jäänyt aines on varsinaista hienokuonaa ja siinä on kuparia enää tyypillisesti alle 0,5 %. (Miikkulainen, 2008)

Vaahdotuksessa talteen saadut kuparimineraalit, eli kuonarikaste, pumpataan sulaton kuivaamolla olevaan sakeuttimeen. Sakeuttimesta rikaste johdetaan painesuodattimen kautta höyrykuivaimen yhdessä kuparirikasteen kanssa, josta ne syötetään edelleen liekkisulatusuuniin. Vaahdotuksesta jäljelle jäänyt kuona pumpataan vesilietteenä Harjavallan sulaton vieressä sijaitseville läjitysalueille. (Boliden Oy, 2008; Kiviö, 2006) Lietteessä on tällöin noin 45 % kiintoainesta (Junnikkala, 2008). Läjitysalueelta lietteestä selkeytynyt vesi johdetaan takaisin rikastamon prosessiin (Boliden Oy, 2008). Kuvassa 1 näkyy putki, josta lietettä lasketaan läjitysalueelle.



Kuva 1: Kuonan pumppaus vesilietteenä läjitysalueelle.

Lietealtaan reunoilta hienokuonaa nostetaan kaivinkoneella läjitysalueen reunoille. Kuonasta rakennetaan läjitysalueen valleja ja kaivinkoneen siirtäessä kuonaa, kuona kuivuu nopeasti. Kuvassa 2 näkyy kaivinkone siirtämässä hienokuonaa.



Kuva 2: Kaivinkone siirtää hienokuonaa läjitysalueen reunalta läjitysalueen reunalle.

## 2.5. Hienokuonan ominaisuudet

Hienokuona koostuu kemiallisesti pääasiassa fajaliittista ( $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ), välilasista ja magnetiitista. Niiden osuudet hienokuonasta ovat yleensä noin 44 % fajaliittia, 33 % välilasia ja 23 % magnetiittia. Kupari esiintyy kuonassa pääasiassa metallisena kuparina, osuus yleensä noin 0,06 %, Cu-Fe-sulfideina, 0,43 %, ja Cu-arsenideina,

0,20 %. Kuonassa voi myös olla pieniä määriä Fe-arsenideja, CuFeSnSb-faaseja, lyijyhohdetta PbS, baryyttia BaSO<sub>4</sub> ja pentlandiittia (Fe,Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>. (Fagerlund ym., 2004; Kiviö, 2006) Taulukossa 1 on esitetty hienokuonan vuoden 2006 kuukausianalyysien keskiarvotulokset joidenkin aineiden osalta.

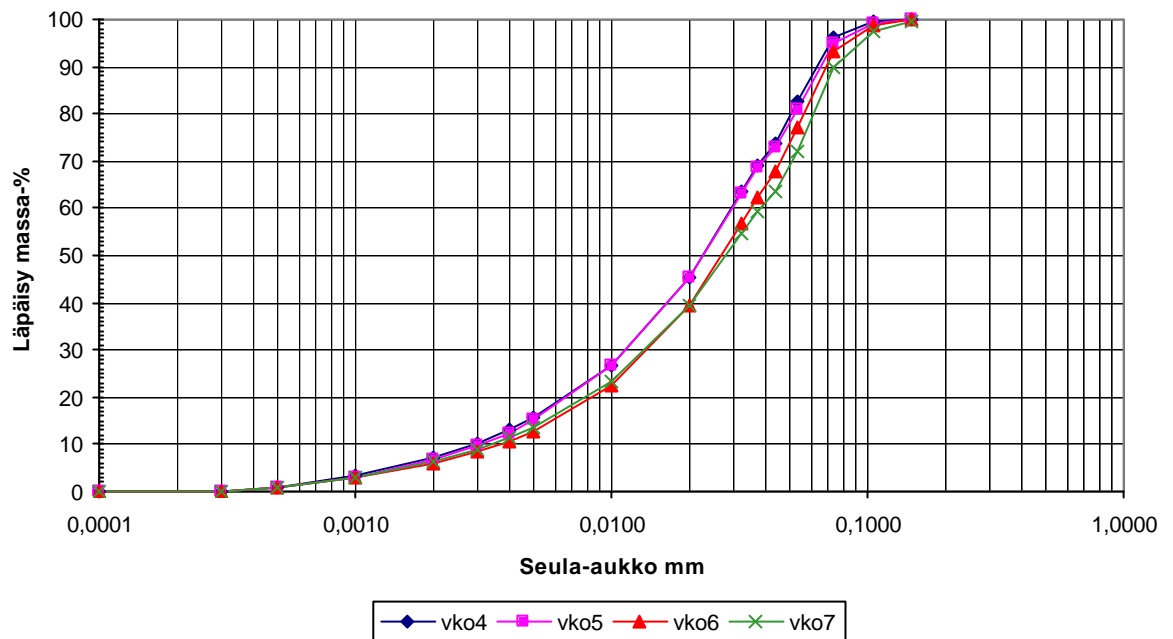
Taulukko 1: Hienokuonan vuoden 2006 kuukausianalyysin tulosten keskiarvot ja minimi- ja maksimi-arvot prosentteina koko näytteestä.

	ka	max	min
Fe	43,0	44,3	41,8
SiO <sub>2</sub>	31,0	32,2	29,8
Zn	1,90	2,40	1,57
Pb	0,37	0,48	0,29
As	0,13	0,16	0,12
S	0,13	0,17	0,09
Ni	0,08	0,10	0,06
Co	0,06	0,18	0,04
Sb	0,02	0,03	0,02

Hienokuonan arseenista noin 60 % on välilasissa ja noin 30 % kuparifaaseissa, lähinnä kupariarsenideissa. Normaalisti arseenia on fajaliitissa ja magnetiitissa alle 0,05 %. Välilasin arseenipitoisuus on yleensä 0,1–0,2 %. (Fagerlund ym., 2004) EU:n kaatopaikkakelpoisuuskriteerien mukaan tavanomaisesta jätteestä saa liueta arseenia 2 mg/kg. Jos liukoisuus on suurempi, on jäte ongelmajätettä. Harjavallan hienokuonasta voi liueta arseenia 3–4 mg/kg olosuhteista riippuen ja se on tämän vuoksi luokiteltu ongelmajätteeksi. (Junnikkala, 2008)

Arseeni voi esiintyä kuonassa monina eri oksideina. Eri oksidit liukenevat erilaisissa olosuhteissa, joten arseenin liukenemiseen vaikuttaa pH:n lisäksi myös läsnä olevat yhdisteet sekä kuonan rakekoko. Voidaan kuitenkin sanoa, että arseenia liukenee eniten happamissa ja emäksisissä olosuhteissa. Normaaleissa luonnon olosuhteissa, joissa pH on 7–8, arseenia liukenee hyvin vähän. (Fagerlund ym., 2004)

Kuvaajaan 1 on piirretty neljän hienokuonanäytteen rakekokojakauma. Näytteet on otettu Harjavallan läjitysalueelta vuonna 2008 viikkoina 4–7. Näytteitä on otettu yksi viikossa. Yli 0,037 mm rakeiden osuus näytteestä on selvitetty seulomalla. Seulonnasta jäänyt alite on tutkittu laserdiffraktiolla. Kuvaajassa esitetyt prosentit ovat painoprosentteja.



Kuvaaja 1: Neljän hienokuonanäytteen raekokojakauma.

Geoteknisessä maalajiluokituksessa saveksi katsotaan rakeet, joiden läpimitta on alle 0,002 mm ja siltiksi rakeet, joiden läpimitta on 0,002–0,06 mm (Rantamäki, ym. 2006). Kaikissa näytteissä hienoainespitoisuus, eli alle 0,06 mm rakeiden läpäisyprosentti, on yli 89 %. Saviaineksen osuus on näytteissä alle 10 %. Keskiraekoko  $d_{50}$  on viikkojen 4 ja 5 näytteissä noin 0,023 mm viikkojen 6 ja 7 näytteissä 0,027 mm. Raekokosuhde ( $C_u = d_{60}/d_{10}$ ) on viikkojen 4 ja 5 näytteillä 9,67 ja viikkojen 6 ja 7 näytteillä 10. Rakeisuudeltaan hienokuonanäytteet vastaavat siis sekarakeista silttiä.

Kuonan rakeisuus vaihtelee läjitysalueen eri osissa, sillä läjityksessä karkea aines laskeutuu lähelle lietteen purkuaukkoa ja hienompi aines laskeutuu keskemälle läjitysalasta. (Lounais-Suomen Ympäristökeskus, 2002) Kuvaajassa esitetyt näytteet on otettu rikastamon pumppukaivon tuloputkesta, joten tutkitut näytteet kuvaavat lajittumatonta kuonaa.

Taulukossa 2 on esitetty joitain hienokuonan luokitusominaisuuksia. Suomessa kivennäismaalajien kiintotiheys on normaalisti 2,6–2,8 t/m<sup>3</sup> ja kuivatilavuuspaino maksimissaan 21 kN/m<sup>3</sup> (Rantamäki, ym. 2006). Hienokuona on huomattavasti raskaampaa kuin luonnon maa-materiaalit. Optimivesipitoisuus, joka kuvaa sitä

vesipitoisuutta, jossa materiaali tiivistyy parhaiten, vastaa kivennäismaalajeja. Hienokuonan kitkakulma riippuu kuonan tiivistysasteesta ja vaihtelee välillä 38°–49°. Suuri kitkakulman arvo johtuu hieno-kuonan karkeista raepinnoista. (Kiviö, 2006; Rantamäki, ym., 2006) Hienokuonan luonnollinen pH on välillä 7-9 (Junnikkala, 2008).

Taulukko 2: Hienokuonan luokitusominaisuuksia (Kiviö, 2006).

	Kiintotiheys [t/m <sup>3</sup> ]	Ominais- pinta-ala [m <sup>2</sup> /kg]	Kuivatilavuus- paino, max. [kN/m <sup>3</sup> ]	Optimivesi- pitoisuus [%]	Veden absorptio [paino-%]
Hienokuona	3,985	796	24,42	10	0,34

Hienokuonan kapillaarinen nousukorkeus on n. 1,3 m (Lounais-Suomen Ympäristökeskus, 2002). Materiaalia pidetään routivana, jos kapillaarinen nousukorkeus on yli 1 metriä. Hienokuona on routivaa.

Hienokuonan vedenläpäisevyys riippuu kuonan lajittuneisuudesta ja tiivyydestä. Löyhän tilan vedenläpäisevyysarvo  $k$  on  $10^{-6,8}$  m/s ja tiiviin tilan  $10^{-7,1}$  m/s. Tiiviissä tilassa olevan lajittumattoman hienokuonan vedenläpäisevyysarvo on noin  $10^{-8}$  m/s. Hienokuonan vedenläpäisevyysarvot vastaavat siltin vedenläpäisevyysarvoja. Siltti on määritelty huonosti vettäläpäiseväksi. (Rantamäki ym., 1999) Hienokuonan vesipitoisuus on noin 30 %, kun se on läjitysalueen altaassa täysin veden kyllästävässä tilassa. Hienokuonaa nostetaan altaan reunoilta läjitysalueen reunoille kaivinkoneella. Läjitysalueen reunoilla hieno-kuonan vesipitoisuus on 15–20 % (Kiviö, 2006).

### 3. Kevytsora

#### 3.1. Perustietoja maxit Oy Ab:n tuotannosta

Suomessa kevytsoraa valmistaa yksi yritys, maxit Oy Ab. maxit Oy Ab on osa kansainvälistä maxit Groupia, joka siirtyi vuoden 2008 maaliskuun alussa Heidelberg Cement Groupilta ranskalaisen Saint-Gobain Groupin omistukseen. Saint-Gobain Group toimii 57 maassa ja sillä on noin 207 000 työntekijää. maxit Group on toiminut tähän asti noin 30 maassa ja sillä on noin 5000 työntekijää. Päämarkkina-alueet ovat Eurooppa, Venäjä ja Kiina. Ennen maxit Groupiin yhdistymistä Suomessa toimiva maxit Oy Ab tunnettiin nimellä Optiroc Oy Ab. (maxit Group, 2008)

Suomessa maxit Oy Ab valmistaa mineraalipohjaisia rakennusmateriaaleja. Sen tuote-merkkejä ovat Leca, Kahi ja Vetonit. Leca-tuotteet ovat kevytsoraa ja kevytsora-harkkoja. Kahi-tuotteet ovat kalkkiehkeätiiliä ja -harkkoja ja Vetonit erilaisia laasteja ja betoneita. (maxit Oy Ab, 2008) Kevytsoratuotteiden LECA-tuotenimi tulee suoraan kevytsoran englanninkielisestä termistä, Lightweight Expanded Clay Aggregate.

maxit Oy Ab:lla on Suomessa 11 tehdasta 10 eri paikkakunnalla. Kevytsoratehtaita on yksi ja se sijaitsee Kuusankoskella. (maxit Oy Ab, 2008) Kevytsoratehdas aloitti toimintansa vuonna 1951, jonka jälkeen siihen on tehty laajennuksia vuosina 1963 ja 1991. Aikaisemmin tehtaassa oli kaksi rumpu-uunia, mutta nykyään käytössä on vain yksi. Uunin kapasiteetti on noin 1500 m<sup>3</sup> kevytsoraa vuorokaudessa. Tehtaan nykyinen vuosi-kapasiteetti on noin 420 000 m<sup>3</sup>/vuosi eli 123 500 tonnia/vuosi. Koko tehtaan tuotanto käytetään kotimaan rakennushankkeisiin ja noin puolet tuotetusta kevytsorasta käytetään kevytsoraharkkoihin. Suomen kevytsoramarkkinoilla vuoden 2005 tietojen mukaan Optiroc Oy:n eli nykyisen maxit Oy Ab:n markkinaosuus oli 85 %. (Mukkula, 2008a; Ohlström ja Savolainen, 2005)

Kevytsora on keraaminen, palamaton tuote, jota saadaan paisuttamalla savea. Kevytsoraa käytetään maarakentamisessa kevennysmateriaalina ja routasuojauksena. Talonrakennuksessa kevytsora toimii mm. ylä- ja alapohjien lämmöneristeenä. Murskattua kevytsoraa käytetään puutarhassa maanparannukseen ja kevyen liikenteen väylillä hiekoittamiseen. Kevytsora on myös kevytsorabetonin yksi raaka-aine. (RT K-36951,



Leca-sora, 2005) Kevytsoraa voidaan käyttää myös kapillaarisena katkona, mutta sitä varten sora pitää käsitellä lisäaineella. Lisäaine muodostaa kevytsorarakkeen päälle kalvon, joka estää veden nousun. (maxit Oy Ab, 2008)

## **3.2. maxit Oy Ab:n LECA-soran valmistus**

### **3.2.1. Raaka-aineet**

#### Käytetyt raaka-aineet

Kevytsoran pääraaka-aine on plastinen savi ja sen osuus käytettävästä raaka-aineseoksesta on noin 98 % (Ohlström ja Savolainen, 2005). Raskasta polttoöljyä sekoitetaan saveen tehostamaan paisuntaprosessia. Tarvittavan öljyn määrä riippuu saven paisuntaominaisuuksista, normaalisti öljyä lisätään saveen 0,5–1 painoprosenttia. (Mukkula, 2008a; Wiklund, 2007) Saven polttovaiheessa prosessiin lisätään kalkkikivijauhetta tehostamaan palamista (Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, 2004). Kalkkikivijauheen on myös todettu siirtävän lämpöä uunin polttovyöhykkeestä kuivatusvyöhykkeeseen sekä vähentävän kevytsorarakkeiden tarttumista toisiinsa. (Mukkula, 2008b)

Aikaisemmin kevytsoran raaka-aineseokseen on lisätty raskaan polttoöljyn lisäksi myös mm. kierrätyspolttoöljyä ja Raisio Oy:n margariinin tuotannosta peräisin olevaa valkaisumaajätettä. Toisinaan saveen on sekoitettu myös Kuusankosken tehtaan omaa voiteluöljyä ja sähkösuodattimen tuhkaa. (Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, 2000)

#### Savi

Saveksi kutsutaan maalajeja, joissa savipitoisuus, eli alle 0,002 mm rakeiden osuus on yli 30 %. Savea kutsutaan laihaksi saveksi, jos savipitoisuus on 30–50 % ja lihavaksi saveksi, jos savipitoisuus on yli 50 %.

Suomen savet koostuvat pääasiassa viime jääkauden aikana suhteellisen vähän rapautuneesta kivijauheesta, jääkauden jälkeen rapautuneista, kiillemäisistä mineraaleista sekä edellisiltä lämpö- ja jääkausilta peräisin olevista, uudelleen kerrostuneista savimineraaleista (Raita, 2003). Taulukossa 3 on esitetty Suomen savien kemiallinen keskiarvokoostumus kahden eri tutkimuksen mukaan.

Taulukko 3: Suomen savien keskikoostumus kahden eri tutkimuksen mukaan  
(Raita, 2003).

Ainesosa	Pitoisuus savissa, %	
	Soveri	Koljonen & Carlson
SiO <sub>2</sub>	58,67	61,89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,00	18,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,42 *	3,89
H <sub>2</sub> O	3,31	-
K <sub>2</sub> O	3,27	3,02
FeO	2,95 *	3,72
MgO	2,81	3,05
Na <sub>2</sub> O	2,65	3,30
CaO	2,17	2,12
Org.aines	0,87	-
TiO <sub>2</sub>	0,69	0,81
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,36	0,20
SO <sub>3</sub>	0,19 *	-
S	0,14 *	-
MnO	0,11	0,08
Cl	0,01	-

\* Riippuu osittain näytteenoton jälkeen tapahtuneen saven hapettumisen määrästä

Suomalaisten savien pääkomponentteja ovat siis piidioksidi (SiO<sub>2</sub>), alumiinioksidi (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ja raudan oksidit. Kemiallisesti eniten saven ominaisuuksiin vaikuttaa silikaattiryhmän mineraalit. Saven ominaisuuksiin vaikuttaa suuresti myös saviesiintymän geologinen historia. (Raita, 2003)

Saven selvin ominaisuus on sen muovailtavuus eli plastisuus. Tämä ominaisuus kuitenkin muuttuu vesipitoisuuden suhteen. Kuiva savi on kovaa ja murenee muokattaessa. Tarpeeksi suurella vesipitoisuudella savi taas muuttuu juoksevaksi. Kuivan ja juoksevan saven väliin jää alue, jossa savi on plastista.

Kevytsoran raaka-aineena käytettävän saven tulee olla plastista ja paisuvaa. Parhaat paisumisominaisuudet kevytsoran valmistuksen kannalta on lihavalla savella, jonka vesipitoisuus on 40–50 % (Kärkkäinen, 1991). Kuusankosken tehtaalla raaka-aineena käytettävän saven vesipitoisuus on noin 42 % (Mukkula, 2008a).

Paisumisominaisuuksiin vaikuttavat pääasiassa humus- ja rautaoksidipitoisuus. Savi paisuu parhaiten, kun saven hehkutushäviö on 3–7 %. (Kärkkäinen, 1991) Saven

mineralogian pitää olla tietynlainen, jotta saven käyttö kevytsoran raaka-aineena on mahdollista. (Raita, 2008)

### Raskas polttoöljy

Öljy on fossiilinen polttoaine, joka on syntynyt ajan saatossa, kun kasveja ja eliöitä on hautautunut sedimenttien alle. Korkean paineen ja kuumuuden vaikutuksesta eloperäinen materiaali on miljoonien vuosien aikana muuttunut nestemäisiksi ja kaasumaisiksi hiilivedyiksi. Syntynyt öljy on varastoitunut maaperään huokosiin kiviin tai kallion onkaloihin.

Raakaöljystä erotetaan erilaisia hiilivetyjä tislamalla. Tislauksen raskaimmasta osasta valmistetaan raskasta polttoöljyä. Raskaan polttoöljyn hiilivetyjen molekyylit sisältävät vähintään 20 hiiliatomia. Raskasta polttoöljyä käytetään lähinnä teollisuuden, laivojen ja junien polttoaineena.

Kuusankosken kevytsoratehtaan tällä hetkellä käytettävä raskas polttoöljy on Teboil Raskas Polttoöljy 180:tä. (Mukkula, 2008b) Kyseisessä polttoöljyssä on alle 1 paino-% rikkiä. Nikkeliä ja vanadiinia siinä on 30 mg/kg. Käytettävän polttoöljyn tiheys on noin 990 kg/ m<sup>3</sup>. Sen leimahduspiste on 95 °C ja jähmepiste -3 °C. Öljyn lämpöarvo on noin 41 MJ/kg. (Teboil, 2008)

### **3.2.2. Valmistusprosessi**

Kuusankoskella kevytsoraa valmistetaan polttoprosessilla luonnon savesta kaksiosaisessa, 70 metriä pitkässä pyörivässä rumpu-uunissa (Ohlström ja Savolainen, 2005). Uunin ensimmäisessä osassa luonnon savi kuivataan ja toisessa osassa poltetaan. Prosessin aikana lämpötila polttovyöhykkeessä on 1100–1150 °C. (Mukkula, 2008a) Kuvassa 3 on Kuusankosken kevytsoratehtaan rumpu-uuni.



Kuva 3: maxit Oy Ab:n Kuusankosken kevytsorastehtaan rumpu-uuni.

Luonnosta nostettu savi ajetaan varastoihin, joissa savi seisoo yleensä 2–3 päivää. Toisinaan savi voi olla varastoituna kuitenkin jopa vuoden ja toisinaan juuri luonnosta nostettu savi voi mennä suoraan tuotantoon. Varastosta savi johdetaan murskainten kautta sekoittimeen. Savi murskataan, jotta savessa luonnollisesti olevat ja varastoinnin aikana mahdollisesti syntyneet paakut saadaan poistettua. (Wiklund, 2007) Kuvassa 4 vasemmalla on näkymä savivarastosta ja oikealla on kuva saven murskaimesta.



Kuva 4: Vasemmalla näkymä savivarastosta, oikealla kuva saven murskaimesta.

Saven ominaisuuksista riippuen saveen lisätään sekoittimissa 0,5–1 painoprosenttia raskasta polttoöljyä parantamaan paisumisprosessia (Mukkula, 2008a). Sekoittajista esikäsitelty savi johdetaan uunin ensimmäiseen osaan, jossa se kuivuu ja lämpenee hitaasti siirtyessään eteenpäin pyörivässä, kaltevassa uunissa (Wiklund, 2007). Uunin toisessa

osassa savi poltetaan suurella happiylijäämällä. Poistokaasuissa on 12–13 % happea. (Mukkula, 2008a) Uunin poltto-osa pyörii nopeammin kuin kuivausosa. Pyörimisliikkeen vaikutuksesta savimassasta irtautuu rakeita. Lähestyttäessä uunin kuumaa osaa, savirakeiden pinta sulaa muodostaen rakeen pinnalle tiukan kuoren eli rakeiden pinta sintraantuu. Kuori estää rakeiden sisälle muodostuvien kaasujen purkautumisen ja näin ollen savirakeet paisuvat kevytsoraksi. (Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, 2004; Wiklund, 2007)

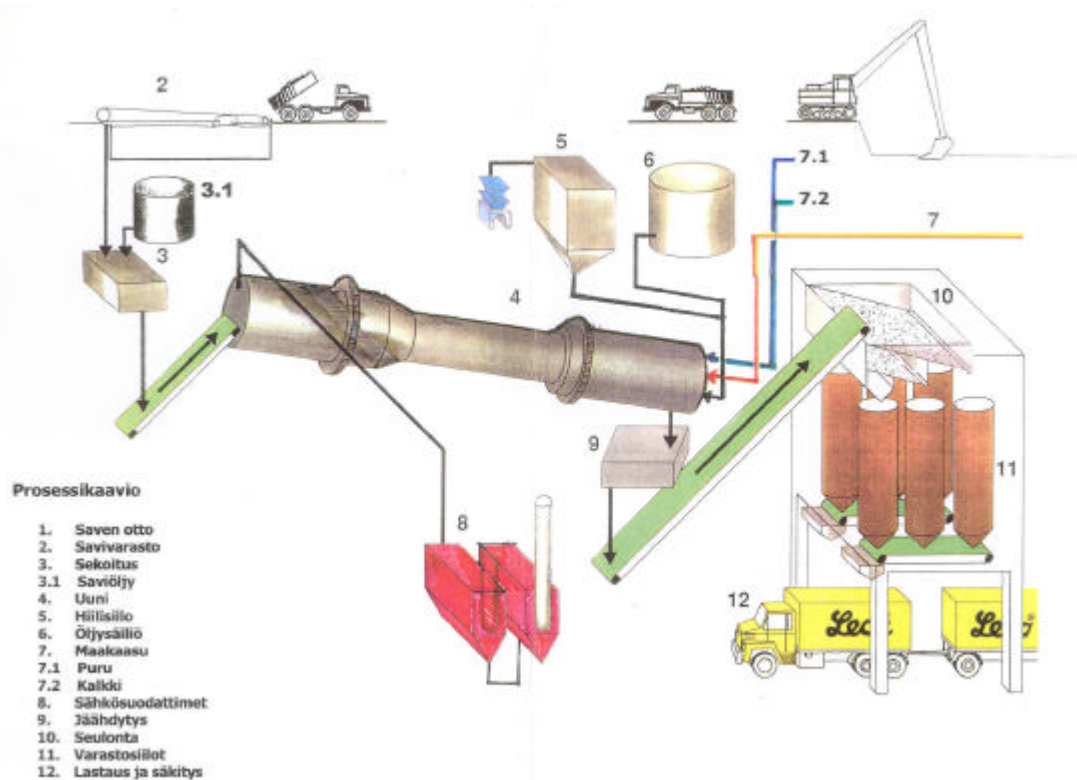
Polton jälkeen kevytsora jäähdytetään kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa kevytsoraraketta jäähdytetään ilmalla tehokkaammin kuin toisessa vaiheessa. Jäähdytysnopeuden pitää olla oikea, jotta rakeet pysyvät paisuneina. Jos rakeiden sisäosan kaasut jäähtyvät liian nopeasti, rae luhistuu. Toisessa vaiheessa jäähdytyksen teho on matalampi, jotta rakeiden lujuus ei pieneneisi. (Wiklund, 2007; Mukkula, 2008a)

Jäähdytyksen jälkeen prosessista saatu kevytsora kuljetetaan seulottavaksi tai väli-varastoon. Kevytsora voidaan seuloa haluttuun rakeisuuteen. Tilaajalle kevytsora toimitetaan joko irtotavarana tai säkitettynä. (Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, 2004; Raita, 2008) Kuvassa 5 on seulontatorni.



Kuva 5: Kevytsoran seulontatorni.

Kevytsoran tuotannon eri vaiheet on esitetty kuvassa 6.

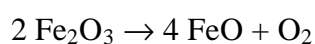
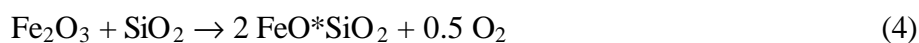
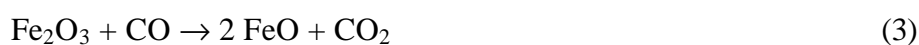


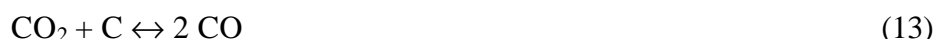
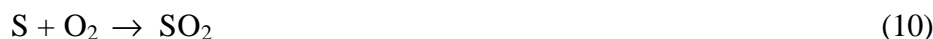
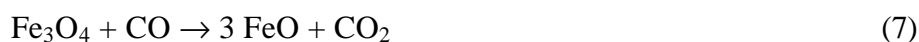
Kuva 6: Kevytsoran tuotannon eri vaiheet

(Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, 2004).

### 3.2.3. Paisumisprosessi

Saven polttovaiheessa raaka-aineseoksen orgaaninen hiili ja rauta reagoivat synnyttäen kaasuja, lähinnä hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Syntyneet kaasut eivät pääse pois savirakeen sintraantuneen kuoren alta, joten savirake paisuu huokoiseksi kevytsorarakkeeksi. Alla on esitetty reaktioita, joita paisuntaprosessissa oletetaan tapahtuvan. Reaktioista voidaan nähdä, että paisuntaprosessin kannalta sekä rauta että orgaaninen hiili ovat rajoittavia tekijöitä. (European Commission. 2007; Wiklund, 2007)





(European Commission, 2007)

### 3.2.4. Polttoaineet

Kuusankoskella kevytsorauunissa voidaan vanhan ympäristöluvan puitteissa polttaa monenlaisia aineita, kunhan päästöt eivät kasva liian suuriksi (Wiklund, 2007). Polttoaineina on käytetty mm. kivihiiltä, turvekoksia, maakaasua, kierrätyspolttoaineita ja sahanpurua. Vuonna 2002–2003 polttoaineena käytettiin myös lihaluujauhoa. Kevyt-soran valmistuksen pääpolttoaineena käytetään kivihiiltä, mutta prosessin ylösajo tehdään maakaasulla. (Ohlström ja Savolainen, 2005) Taulukossa 4 näkyy, kuinka paljon eri polttoaineita käytettiin Kuusankosken tehtaalla vuonna 2006.

Taulukko 4: maxit Oy Ab:n Kuusankosken tehtaalla käytetyt polttoaineet vuonna 2006 painoprosentteina kokonaismäärästä (Wiklund, 2007).

Polttoaine	Maakaasu	Raskas polttoöljy	Kierrätyspolttoaine	Hiili	Sahanpuru
Paino-%	1	10	19	51	18

Tämän diplomityön puitteissa tehtyjen tehdaskoeajojen aikana huhti- ja toukokuussa vuonna 2008 käytetyt polttoainemäärät näkyvät taulukossa 5.

Taulukko 5: maxit Oy Ab:n Kuusankosken tehtaalla käytetyt polttoaineet huhti-toukokuussa 2008 painoprosentteina kokonaismäärästä.

Polttoaine	Maakaasu	Öljy	Hiili	Sahanpuru
Paino-%	1,3	18,5	80	0,1

### 3.3. Kevytsoran ominaisuudet

Kevytsora on keraaminen ja palamaton tuote. Kevytsoran pehmenemispiste on noin 950 °C ja sulamispiste noin 1150 °C. Kevytsoran tärkeimmät ominaisuudet ovat sen keveys ja pieni lämmönjohtavuus. Kevytsora kestää myös hyvin eri aineiden vaikutukset sekä toistuvat jäätymisen ja sulamisen vaikutukset. (RT K-36951, Leca-sora, 2005; Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, 2004 )

Kevytsora on neutraali materiaali, jonka pH on välillä 7–10. Kevytsora vastaa kantavuusominaisuuksiltaan kitkamaata ja sen kitkakulma on 33°–37° tiivyydestä riippuen. Kevytsoran lämmönjohtavuuden arvona käytetään maarakennuksen routasuojauksissa 0,13 W/m°C, kun soran vesipitoisuus on 30 %. Kevytsoran irtokuivatiheys vaihtelee raekoon mukaan ja vaihteluvälit on esitetty taulukossa 6. (RT K-36951, Leca-sora, 2005; Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, 2004 )

Taulukko 6: Kevytsoran lajitteet ja niiden irtokuivatiheydet  
(RT K-36951, Leca-sora, 2005).

Lajitetunnus	Raekoko [mm]	Irtokuivatiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
KS04	0...4	325...440
KS310	4...10	240...320
KS820	8...20	205...280
KS432	4...32	220...320
KS032	0...32	230...350
KS420P (puhallus-Leca)	4...20	225...305
KS38M (murskattu Leca)	3...8	185...250

Maarakentamisessa kevytsoran tilavuuspainona käytetään arvoa 4–6 kN/m<sup>3</sup>. Mitoitusarvona kuivalle penkereelle käytetään arvoa 4 kN/m<sup>3</sup>, ajoittain veden alla olevalle penkereelle 5 kN/m<sup>3</sup> ja pysyvästi veden alla olevalle penkereelle 10 kN/m<sup>3</sup>. (RT K-36951, Leca-sora, 2005; Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, 2004 )



#### **4. Tehdasmittakaavan koeajot maxit Oy Ab:n kevytsora-tehtaalla Kuusankoskella**

Kuusankoskella, maxit Oy Ab:n kevytsoratehtaalla tehtiin huhti- ja toukokuussa 2008 tehdas-mittakaavan koeajoja hienokuonalla. Hienokuonaa lisättiin saven sekaan ja raaka-aine-seos ajettiin normaalisti prosessin läpi. Hienokuonan osuutta raaka-aineseoksessa vaihdeltiin ja lopuksi myös saviöljyn määrää vähennettiin normaalista.

Hienokuonaa tuotiin Harjavallasta Kuusankoskelle rekka-autolla ja kuona varastoitiin Kuusankoskella pressukatokseen. Varastointipaikalla oli estetty sade- ja pintavesien pääsy kosketuksiin hienokuonan kanssa. Hienokuonavarasto näkyy kuvassa 7.



Kuva 7: Hienokuonavarasto Kuusankoskella.

Hienokuonaa alettiin syöttää maxit Oy Ab:n tuotantoprosessiin 10.4.2008. Hienokuonaa lisättiin saven sekaan 600 kg/h, mikä vastasi noin 2,2 prosenttia uuniin menneestä raaka-ainemäärästä tunnissa. Hienokuonan syöttö aloitettiin puolenpäivän aikaan ja sitä jatkettiin puoleen yöhön saakka. Perjantaina 11.4. hienokuonan määrä nostettiin 1400 kg/h, mikä vastasi noin 5 prosenttia kokonaisraaka-ainemäärästä tunnissa. Tällä määrällä hienokuonaa syötettiin klo 9–16 välisenä aikana. Hienokuona-ajoja ei tehty viikonloppuna, vaan koetta jatkettiin maanantaina 14.4. Silloin prosessiin syötettiin hienokuonaa 2200 kg/h, mikä vastasi noin 8 %:a raaka-ainemäärästä. Hienokuonaa

syötettiin prosessiin klo 10–15 välisenä aikana. Maanantain jälkeen koeajoissa pidettiin taas parin päivän tauko, sillä seuraava kuorma hienokuonaa ei ollut vielä saapunut ja vanha oli käytetty. Koeajoa jatkettiin 17.4. syöttämällä prosessiin 2200 kg/h hienokuonaa ja vähentämällä saviöljyn määrä noin 0,3 prosenttiin raaka-aineseoksesta eli hieman alle puoleen normaalista määrästä. Tällä reseptillä jatkettiin aina seuraavaan aamuun klo 8 asti, jonka jälkeen hienokuonan määrä tiputettiin 1400 kg/h saviöljyn määrän pysyessä noin 0,3 %:ssa. Uudella reseptillä jatkettiin klo 23 asti. Hienokuonaa syötettiin prosessiin 23. ja 24.4. 900 kg/h, joka vastasi noin 3 %:a raaka-ainemäärästä. Saviöljyn määrä 23.4. oli aluksi noin 0,5 %, mutta se nostettiin hieman ennen puoltayötä 0,6 % prosenttiin. 24.4. savi-öljyn määrä vaihteli 0,5 %:n ja 0,7 %:n välillä. Rumpu-uunin toimintapiste oli koko ajan sama, eli sitä ei muutettu käytettäessä hienokuonaa lisäaineena.

Toinen koeajojakso suoritettiin toukokuun lopulla samaan aikaan kun tehtaalla suoritettiin ulkopuolisen konsultin toimesta savukaasujen ja päästöjen mittausta. maxit Oy Ab:lla on käytössä jatkuvatoiminen päästömittaus, mutta sillä ei saada tietoa raskasmetalleista. Ulkopuolisen suorittamalla mittauksella saatiin selville, miten hienokuonan lisääminen prosessiin vaikuttaa päästöihin. Päästömittausten aikana 21. ja 22.5. hienokuonaa syötettiin prosessiin 900 kg/h ja saviöljyn määrä oli noin 0,7 %.

Huhtikuun koeajoissa hienokuona lisättiin saven mukaan hihnakuuljettimille. Savi ja kuona sekoittuivat keskenään vasta kuivausuunissa. Toukokuun koeajoissa hienokuona lisättiin prosessiin ennen saven sekoittimia, jolloin hienokuona sekoittui saveen jo ennen uuniin menoa. Prosessin ajon kannalta hienokuonan syöttökohdalla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta. (Mukkula, 2008c)

maxit Oy Ab:n voimassaolevan ympäristöluvan mukaan maxit saa tehdä tehdasmittakaavan koeajoja uusille raaka- ja lisäaineille sekä polttoaineille pelkällä ilmoituksella ympäristölupaviranomaiselle. maxit Oy Ab hakee paraikaa uutta ympäristölupaa, jolla se saisi helpotuksia päästörajoihinsa, jotka vanhaan ympäristölupaan kirjattiin liian tiukoiksi. Uusi ympäristölupa astuu todennäköisesti voimaan syksyn 2008 aikana. Uuteen ympäristölupaan on sisällytetty mahdollinen hienokuonan käyttö kevytsoran lisäaineena ja lupa jatkaa tehdasmittakaavan koeajoja. (Mukkula, 2008c)

## 5. Laboriotutkimukset

### 5.1. Kokeet ja tutkittavat näytteet

Hienokuonaa sisältävää kevytsoraa tuotettiin huhti- ja toukokuussa Kuusankosken kevytsoratehtaalla tehdasmittakaavaisissa koeajoissa erilaisilla resepteillä, joissa muuteltiin saven sekaan lisättävien hienokuonan ja saviöljyn osuuksia. Tutkimuksia varten otettiin kevytsoranäytteet seitsemänä eri ajankohtana. Taulukossa 7 on esitetty tutkittavat näytteet, näytteenottoajankohdat sekä saviöljyn ja hienokuonan paino-prosenttiosuudet määstä raaka-ainesyötteestä. Hienokuonaa sisältäviä näytteitä on 6 kappaletta, joista kaksi sisältää aina saman prosenttiosuuden kuonaa; ero on saviöljyn määrässä. Saman määrän hienokuonaa sisältävät näytteet muodostavat näytepareja, jotka myös näkyvät taulukossa. Tästä eteenpäin näytteisiin viitataan taulukon mukaisilla näytenumeroilla ja näytepareihin kirjaimilla.

Taulukko 7: Tutkittavat näytteet, näytteenottopäivämäärät ja hienokuonan ja saviöljyn pitoisuudet.

	Näytteenotto- päivämäärä	Hienokuonan %-osuus	Saviöljyn %-osuus	
0-näyte	8.5.2008	0	0,7	
Näyte 1	22.5.2008	3	0,7	Näytepari A
Näyte 2	23.4.2008	3	0,5	
Näyte 3	11.4.2008	5	0,6	Näytepari B
Näyte 4	18.4.2008	5	0,3	
Näyte 5	14.4.2008	8	0,7	Näytepari C
Näyte 6	17.4.2008	8	0,3	

Laboriotutkimuksissa oli tarkoituksena tutkia, miten hienokuonan lisääminen, ja toisaalta saviöljyn määrän vähentäminen, vaikuttavat kevytsoratuotteen ominaisuuksiin. Tuotteen laadun kannalta on tärkeää, että materiaaliominaisuudet täyttävät tuotteelle määrätyt vaatimukset. Ympäristön kannalta taas on tärkeää, että käyttökohteessaan kevytsorasta ei liukene liikaa haitta-aineita eikä sen valmistuksessa synny liikaa haitallisia päästöjä. Rakennusmateriaaleille ei ole määrätty omia liukoisuusraja-arvoja, joten tässä diplomityössä niihin sovelletaan pysyvän jätteen kaatopaikalle määrättyjä arvoja.

Laboriotutkimuksissa näytteistä tutkittiin kevytsorarakeiden mineralogaa, tiheyttä, huokoisuutta, hiertymistä, puristumurtolujuutta, liukoisuutta ja veden kapillaarista

nousukorkeutta. Puristusmurtolujuutta tutkittiin yksittäisen rakeen kohdalla sekä kevytsorapatsaalla. Liukoisuutta tutkittiin kaksivaiheisella ravistelutestillä, läpivirtaustestillä ja pH-staattisella testillä. Kaksivaiheinen ravistelutesti tehtiin kaikille näytteille, paitsi näytteelle 1, kun taas läpivirtaustesti tehtiin vain näytteelle 1 ja pH-staattinen testi vain näytteelle 5. Veden kapillaarinen nousukorkeus kevytsorassa määritettiin näytteelle 5. Näyte 1 on mukana vain osassa kokeita, sillä näyte otettiin vasta 22.5., jolloin osa kokeista oli jo ehditty aloittaa tai saatu jo valmiiksi.

Laboratoriotutkimukset suoritettiin kahdessa paikassa, maxit Oy Ab:n kevytsora-tehtaalla Kuusankoskella ja Outotec Research Oy:n laboratoriossa Porissa. Kuusankoskella tutkittiin kevytsoran murskautuvuutta ja kapillaarista nousukorkeutta, muut tutkimukset suoritettiin Porissa.

## **5.2. Mineralogia- ja rakennetarkastelut**

### **5.2.1. Röntgendiffraktometri**

Röntgendiffraktometrillä saadaan selville, mistä alkuaineista ja yhdisteistä tutkittava näyte koostuu. Tutkimusta varten kevytsorarae jauhettiin huhmareessa ja jauhe kaadettiin koneen tutkimusastiaan. Röntgendiffraktometri lähettää kupari k-alfa – säteilyä näytteeseen ja mittaa kulmafunktiona näytteestä syntyvät heijasteet eli intensiteetit. Syntyneiden intensiteettien perusteella laite hakee tietokirjastoista mahdollisia aineita ja yhdisteitä, joiden heijasteisiin se vertaa syntyneitä intensiteettejä. Kone tunnistaa näytteestä faasit, joita on yli 5 %. Käytetty röntgendiffraktometrin merkki oli Bruker AXS D8Focus. (Taskinen, 2008) Käytetty laite on kuvassa 8.



Kuva 8: Röntgendiffraktometri.

### ***5.2.2. Optinen mikroskooppi***

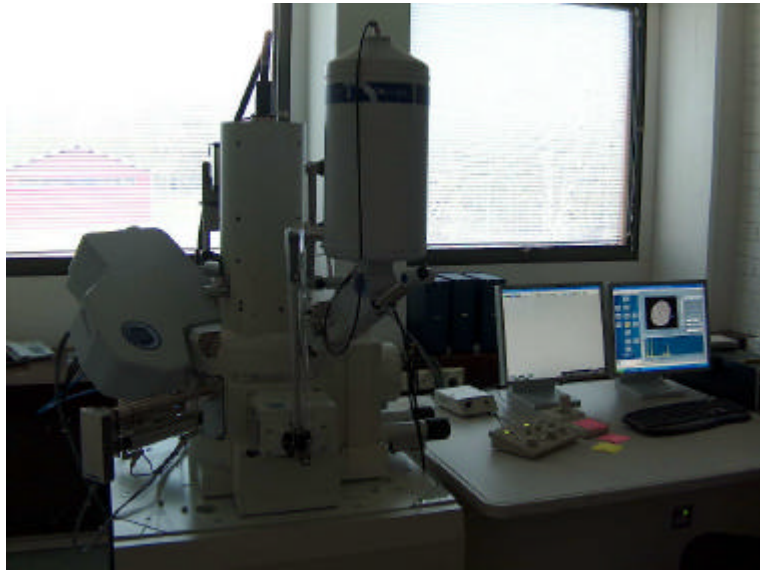
Optinen mikroskopia perustuu valon heijastumiseen tutkittavan näytteen pinnalta. Eri yhdisteet näkyvät mikroskooppikuvassa eri sävyisinä. (Taskinen, 2008) Optisella mikroskoopilla tutkittiin kevytsorarakkeiden rakennetta ja varsinkin kevytsorarakkeen kuoren paksuutta. Käytetty optinen mikroskooppi on kuvassa 9.



Kuva 9: Optinen mikroskooppi.

### ***5.2.3. Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM)***

Pyyhkäisyelektronimikroskoopin lyhenne SEM tulee sanoista Scanning Electron Microscope. Pyyhkäisyelektronimikroskopia perustuu elektronisuihkuun, joka ohjataan näytteeseen. Laite mittaa suihkun näytteen pinnasta irrottamia, näytteelle karakteristisia sekundääri elektroneja, takaisinsironneita elektroneja ja näytteen synnyttämää röntgensäteilyä. Näytteestä voidaan tunnistaa alkuaineita kahdella eri menetelmällä, EDS-analyysillä (Energy Dispersive Spectrometry) ja WDS-analyysillä (Wave Dispersive Spectrometry). EDS-analyysillä voidaan analysoida rajatun alueen koko alkuainespektri samanaikaisesti. WDS-analyysillä taas voidaan mitata vain yksi alkuaine kerrallaan, mutta tulokset ovat EDS-analyysiä tarkempia. (Kiviö, 2006) Kevytsorarakkeiden analysoinnissa käytettiin EDS-menetelmää. Kuvassa 10 on käytetty SEM-laite.



Kuva 10: Pyyhkäiselektronimikroskooppi (SEM).

#### **5.2.4. Näytehien valmistus mikroskopointia varten**

Optista ja SEM-mikroskopointia varten tutkittavasta näytteestä valmistettiin pintahie. Hietä varten kevytsoranäytteestä valittiin yksi rae, joka valettiin muoviin. Tutkittava näyte valetaan muoviin siksi, että muovi tunkeutuu hyvin kaikenlaisiin huukosiin ja pitää tutkittavan materiaalin koossa hieen valmistuksen ja mikroskopoinnin aikana. Muovin kovetuttua, muottia hiottiin eri karheusasteisilla hiekkapapereilla, niin että noin puolet rakeesta hioutui pois. Lopuksi muotin pinta kiillotettiin sametilla ja kiillotusaineella, jotta hionnasta aiheutuneet naarmut saatiin tasoitettua. Kiillotuksen jälkeen hie oli valmis tutkittavaksi. (Taskinen, 2008)

### **5.3. Kiintotiheys**

Kevytsoranäytteiden kiintotiheys määritettiin kaasupyknometrillä. Kiintotiheys kertoo aineen huukosettoman tiheyden. Kevytsorarakeet ovat täynnä erikokoisia suljettuja huukosia. Ennen mittausta rakeet jauhettiin Swing-myllyllä, jotta rakeiden huukoset eivät häiritsisi mittausta. Jauhettua näytettä kaadettiin pyknometrin säiliöön niin, että säiliö täyttyi noin puolilleen. Näytettä tarvittiin 6–8 g/mittaus, joka vastasi noin 30 kevytsoraraetta mittausta kohti. (Eerola, 2008) Käytetyn pyknometrin malli oli Micromeritics AccuPyc 1330. Laite on kuvassa 11.



Kuva 11: Kaasupyknometri (Eerola, 2008).

## 5.4. Huokoisuus

Huokoisuusmittausta varten jokaisesta tutkittavasta näytteestä valittiin 10 rietta. Rakeiden halkaisijat mitattiin kolmesta eri suunnasta ja rakeen halkaisijana käytettiin mittausten keskiarvoa. Tämän jälkeen mitatut 10 rietta punnittiin yhdessä ja rakeille laskettiin yhteistilavuus. (Eerola, 2008) Tilavuutta laskettaessa halkaisijana käytettiin 10 rakeen halkaisijoiden keskiarvoa ja oletettiin, että rakeet ovat pallomaisia. Näytteen irtotiheys saatiin punnitun massan ja lasketun tilavuuden suhteena. Laskennallista irtotiheyttä verrattiin kaasupyknometrillä saatuun kiintotiheyteen. Näytteen huokoisuus prosentteina laskettiin kaavalla 16.

$$n = \frac{r_s - r}{r_s} \cdot 100\% \quad (16)$$

$n$  on huokoisuus, %

$r_s$  kiintotiheys,  $\text{kg/m}^3$

$r$  laskennallinen irtotiheys,  $\text{kg/m}^3$

## 5.5. Murskautuvuus

Murskautuvuustesti tehtiin standardin SFS-EN 13055-1 mukaisesti. Kuivattua näytettä, jonka raekoko oli 4-8 mm, kaadettiin näytteenottokauhalla terässylinteriin, jonka sisähalkaisija oli 113 mm niin, että ylimäärä valui sylinterin ympärille. Täytön jälkeen näyte tiivistettiin täryttämällä sylinteriä ja näytettä tärypöydällä 20 sekuntia. Tärypöytä värähteli noin 3000 värähdystä minuutissa ja pöydän amplitudi ilman kuormaa oli 0,5.



Tärytyksen jälkeen sylinteriin lisättiin näytettä niin, että sylinteri oli täynnä ja näytteen pinta tasainen. Tämän jälkeen sylinteri nostettiin puristimeen ja puristimen mäntä asetettiin varovasti tiivistetyn näytteen pinnalle. Männän voimaa lisättiin kokeen aikana niin, että noin 100 sekunnin aikana saavutettiin näytteessä noin 20 mm kokoonpuristuma. (SFS-EN 13055-1)

Murskautuvuuden arvo saatiin laskettua yhtälöllä 17 (SFS-EN 13055-1).

$$C_a = \frac{L + F}{A} \quad (17)$$

$C_a$  on murskautumiskestävyys, N/mm<sup>2</sup>

$L$  männästä aiheutuva voima, N

$F$  puristusvoima, N

$A$  männän pinta-ala, mm<sup>2</sup>

Testi tehtiin jokaiselle näytteelle 3 kertaa. Testien tuloksista laskettiin näytteen murskautuvuudelle keskiarvo. Kuvassa 12 on käytetty puristuslaitteisto.



Kuva 12: Murskautuvuuden määrittämiseen käytetty puristuslaitteisto.

## 5.6. Yksittäisen rakeen puristumurtolujuus

Yksittäisen kevytsorarakkeen puristumurtolujuutta tutkittiin kylmäpuristuskokeella. Koetta varten kustakin näytteestä valittiin silmämääräisesti 10 kpl hyvälaatuisia rakeita, joiden halkaisija oli noin 10–13 mm. Jokaisen rakeen halkaisija mitattiin kolmesta eri



suunnasta elektronisella työntömitalla ja rakeen halkaisijana käytettiin näiden kolmen mittauksen keskiarvoa. Kuvassa 13 on näytteestä 5 valitut tutkittavat rakeet sekä käytetty työntömitta.



Kuva 13: Tutkittavaksi valitut kevytsorarakeet ja elektroninen työntömitta.

Kun rakeiden halkaisija oli selvitetty, puristettiin rakeita yksi kerrallaan rautasauvalla puntarin päällä. Rakeen murtohetkellä saatu puntarin lukema kertoi murtovoiman kilopondeina. Yksi kilopondi vastaa noin 9,81 newtonia. Yksittäisten rakeiden murtovoimista laskettiin näytteelle keskiarvo, joka muutettiin vastaamaan halkaisijaltaan 12 mm raetta kaavalla 18.

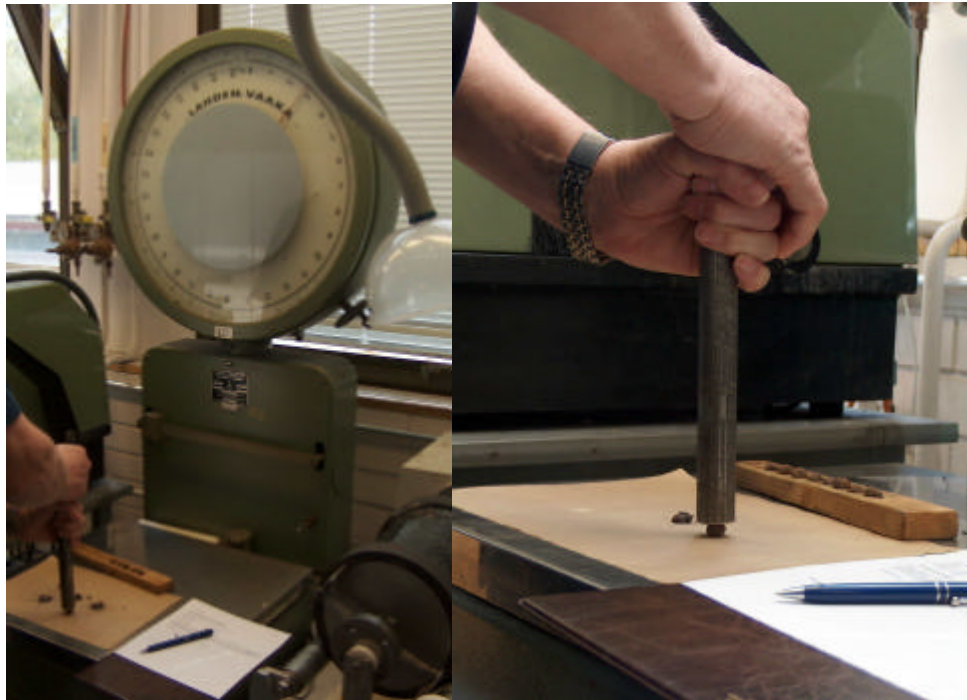
$$F_{12} = F_{ka} \frac{12^2}{d_{ka}^2} \quad (18)$$

$F_{12}$  on 12 mm raetta vastaamaan muutettu murtolujuusarvo, kp

$F_{ka}$  rakeiden murtovoimien keskiarvo, kp

$d_{ka}$  tutkittavien rakeiden halkaisijan keskiarvo, mm

Kuvassa 14 vasemmalla näytettä puristetaan puntarin päällä ja oikealla on lähikuva käytetystä terässauvasta.



Kuva 14: Kuvassa vasemmalla kevytsoraraetta puristetaan puntarin päällä, kuvassa oikealla käytetty terässauva.

## 5.7. Rakeiden hiertyminen

Kevytsorarakeiden hiertymistä tutkittiin mukaillulla Tumbler-testillä. Tumbler-testiä varten tutkittavasta näytteestä poistettiin seulomalla kaikki halkaisijaltaan alle 4,76 mm rakeet. Seulottua näytettä pyöritettiin yhteensä 90 minuuttia rummussa, joka pyöri 23 kierrosta minuutissa. Rummutus pysäytettiin 8 minuutin, 32 minuutin ja 90 minuutin jälkeen, jolloin näyte otettiin pois rummusta ja eri fraktiot punnittiin. Näytteestä punnittiin seuloille 4,76 mm, 1,68 mm, 0,59 mm ja 0,149 mm jääneet osuudet sekä 0,149 mm alite. 8 minuutin ja 32 minuutin pysäytysten jälkeen punnittu näyte laitettiin takaisin rumpuun ja pyöritystä jatkettiin. Kokeen loputtua punnitustuloksista voitiin laskea prosenttiosuudet sille, kuinka paljon ja kuinka pieneksi alkuperäisen näytteen rakeet olivat hiertyneet eri ajankohtina. Kuvassa 15 on käytetty pyöritysrumpu.



Kuva 15: Tumbler-testissä käytetty pyöritysrumpu.

## 5.8. Veden kapillaarinen nousukorkeus

Veden kapillaarista nousukorkeutta tutkittiin näytteellä 5. Kevytsora imee normaalisti hyvin paljon vettä itseensä. Kapillaarisena katkosorana käytettävä kevytsora käsitellään valmistusvaiheessa lisäaineella, joka vähentää veden imeytymistä. Osa näytteestä 5 käsiteltiin laboratoriossa tällä lisäaineella ennen testin suorittamista. Lisäaine ruiskutettiin näytteeseen käsin ja tapahtuma näkyy kuvassa 16.



Kuva 16: Kevytsoran pinnoitus laboratoriossa (Raita, 2008).

Veden kapillaarisen nousukorkeuden testaus suoritettiin standardin SFS-EN 1097-10:2003 mukaan. Ensin testattava näyte jaettiin kahteen osaan. Toisella osalla määritettiin hygroskooppisen veden absorptiokyky ja toisella veden imeytymiskorkeus. Testattavien näytteiden raekoko oli 4-20 mm. Testin eri osissa tarvittavat näytemäärät määräytyvät standardissa suurimman seulakoon mukaan. Suurimman seulakoon ollessa 20 mm, tarvitaan hygroskooppista veden absorptiokyvyn määrittystä varten 0,5 litraa näytettä ja veden imeytymiskorkeuden määrittystä varten 5 litraa näytettä. (SFS-EN 1097-10:2003)

Ennen testien aloittamista näytteet kuivattiin vakiomassaan uunissa, jonka lämpötila oli maksimissaan 110 °C. Hygroskooppisen veden absorptiokyvyn määrittystä varten tarvittiin kaliumsulfaattiliuosta, joka valmistettiin liuottamalla  $12 \pm 1$  g reagenssilaatuista kaliumsulfaattia  $100 \pm 1$  g:an ionivaihdettua vettä koko ajan sekoittaen. (SFS-EN 1097-10:2003)

#### Hygroskooppisen veden absorptiokyky

Hygroskooppisen veden absorptiokyvyn määrittystä varten otettiin kosteussäiliö, jonka keskelle laitettiin kaliumsulfaattiliuosta sisältävä lasiallas. Testattava näyte siroteltiin kosteussäiliöön tasaisesti lasialtaan ympärille. Tämän jälkeen säiliön kansi kiinnitettiin paikoilleen ja tiivistettiin teipillä. Näytteen annettiin olla kosteussäiliössä niin pitkään, kuin veden imeytymiskorkeustesti kesti. Kun veden imeytymiskorkeustesti oli valmis, poistettiin kosteussäiliö ja sisällä ollut näyte punnittiin. Sen jälkeen näyte kuivattiin ja punnittiin näytteen kuivapaino. Hygroskooppisen veden absorptiokyky laskettiin kaavalla 19 (SFS-EN 1097-10:2003).

$$W_{hyg} = \frac{M_{hyg} - M_{hygt}}{M_{hygt}} \cdot 100 \quad (19)$$

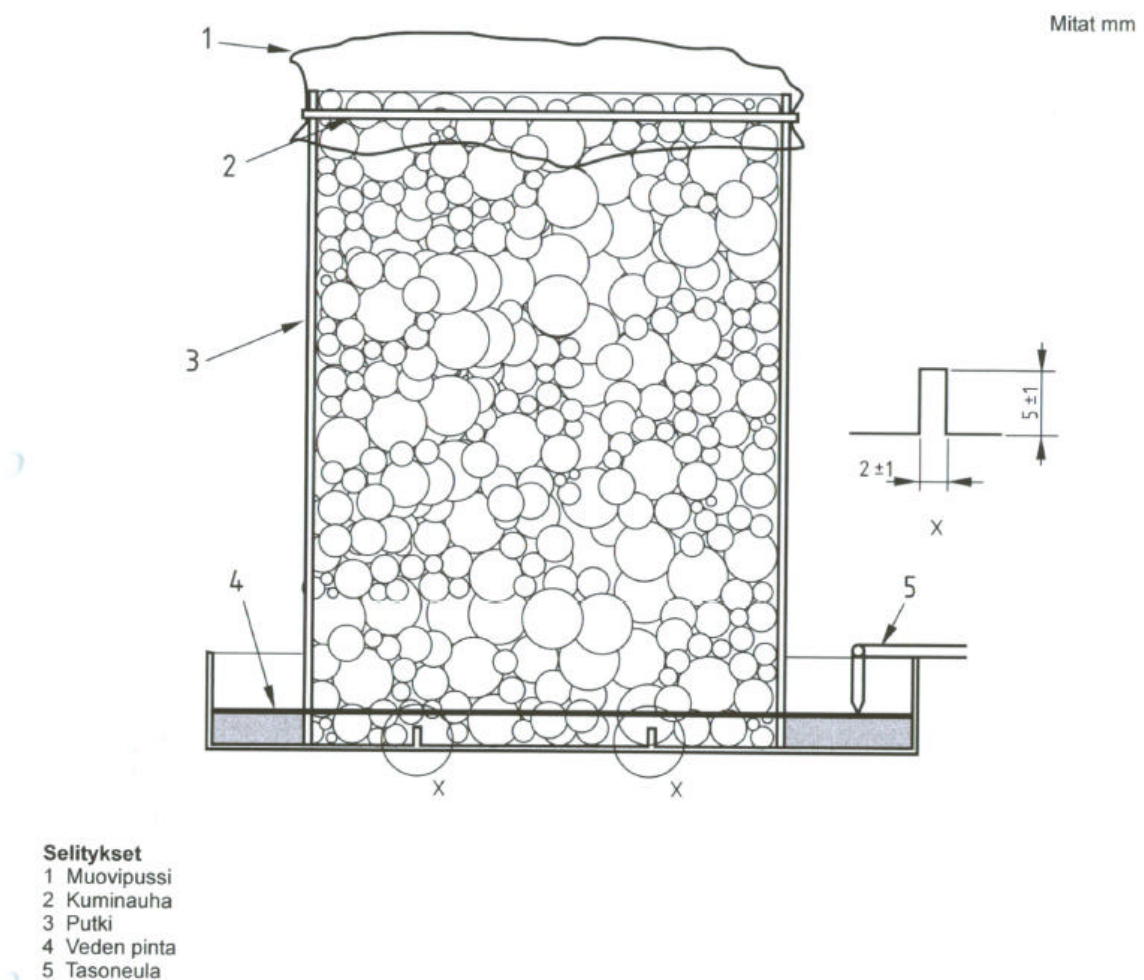
$W_{hyg}$  on hygroskooppisen veden absorptiokyky, %

$M_{hyg}$  kostean materiaalin massa, g

$M_{hygt}$  kuivan materiaalin massa, g

### Veden kapillaarinen nousukorkeus

Veden imeytymiskorkeus määritettiin laittamalla tutkittava näyte kolmessa kerroksessa läpinäkyvään putkeen. Näytettä tiivistettiin jokaisessa kerroksessa puukepillä, jonka annettiin tippua vapaasti näytteen pinnalle maksimissaan 50 mm korkeudelta näytteen pinnasta. Tiivistyksessä varottiin murskaamasta yksittäisiä rakeita. Lopuksi näytteen pinta tasattiin niin, että näytteen pinta oli tasaisesti putken yläpinnan tasolla. Putki sijoitettiin astiaan, jossa oli ruostumattomasta materiaalista tehty neula, joka osoitti veden pinnan tasoa. (SFS-EN 1097-10:2003) Koelaitteiston periaatekuva on kuvassa 17 ja kuvassa 18 on testissä käytetty laitteisto.



Kuva 17: Veden kapillaarisen nousukorkeuden määrittämiseksi käytettävä koelaitteisto (SFS-EN 1097-10:2003).



Kuva 18: Veden kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen (Raita, 2008).

Tiivistetty näyte punnittiin putken ja astian kanssa. Putki ja astia punnittiin myös ennen näytteen tiivistämistä putkeen, joten näiden punnitustulosten perusteella voitiin laskea näytteen tiivistetty irtokuivatiheys kaavalla 20 (SFS-EN 1097-10:2003).

$$r_{\text{kuiva}} = \frac{M_2 - M_1}{V \cdot 1000} \quad (20)$$

$r_{\text{kuiva}}$  on näytteen tiivistetty irtokuivatiheys, kg/m<sup>3</sup>

$M_1$  astian ja tyhjän putken massa, g

$M_2$  astian, putken ja näytteen massa, g

$V$  putken laskettu tilavuus, m<sup>3</sup>

Kun tiivistetty näyte oli punnittu, kiinnitettiin putken yläpäähän muovipussi kumi-  
renkaan avulla. Putken alla olevaan astiaan kaadettiin ionivaihdettua vettä niin, että  
neula puhkaisi veden pinnan. Tämän jälkeen odotettiin  $5 \pm 0,5$  min veden imeytymistä  
näytteeseen ennen kuin astiaan taas lisättiin vettä niin, että neula puhkaisi veden pinnan  
uudestaan. Sitten näytteen, astian, putken ja veden yhteismassa punnittiin. Punnituksen  
jälkeen astiaan lisättiin vettä ja kokonaismassa punnittiin  $24 \pm 2$  h,  $48 \pm 4$  h,  $72 \pm 4$  h ja  
 $168 \pm 4$  h jälkeen ja sitten  $168 \pm 12$  h välein. Testi on valmis, kun massan muutos 7  
päivän aikana on pienempi kuin  $0,2 \text{ kg/m}^2$  veden imupinta-alaa kohti 3 peräkkäisen

7 päivän jakson jälkeen. Testin aikana absorboitunut ja imeytynyt vesimäärä saadaan laskettua kaavalla 21 (SFS-EN 1097-10:2003).

$$W_{ct} = \frac{M_t - M_5}{0,25 \cdot p \cdot d_t^2 \cdot 1000} \quad (21)$$

$W_{ct}$  on absorboitunut ja imeytynyt vesi näytteessä ajan  $t$  jälkeen, g

$M_5$  kokonaismassa 5 min kuluttua veden lisäyksestä, g

$M_t$  kokonaismassa ajan  $t$  jälkeen veden lisäyksestä, g

$d_t$  putken sisähalkaisija, m

Kun testi oli suoritettu ja kokonaismassa punnittu, poistettiin näyte putkesta kerroksittain. Yhden kerroksen paksuuden tuli olla suurempi kuin näytteen suurin seula-koko. Jokainen poistettu kerros punnittiin, jonka jälkeen näyte kuivattiin vakiopainoon. Kerroksille laskettiin vesipitoisuus kaavalla 22 (SFS-EN 1097-10:2003).

$$W_{hi} = \frac{M_3 - M_4}{M_4} \cdot 100 \quad (22)$$

$W_{hi}$  on kerroksen  $i$  vesipitoisuus, massa-%

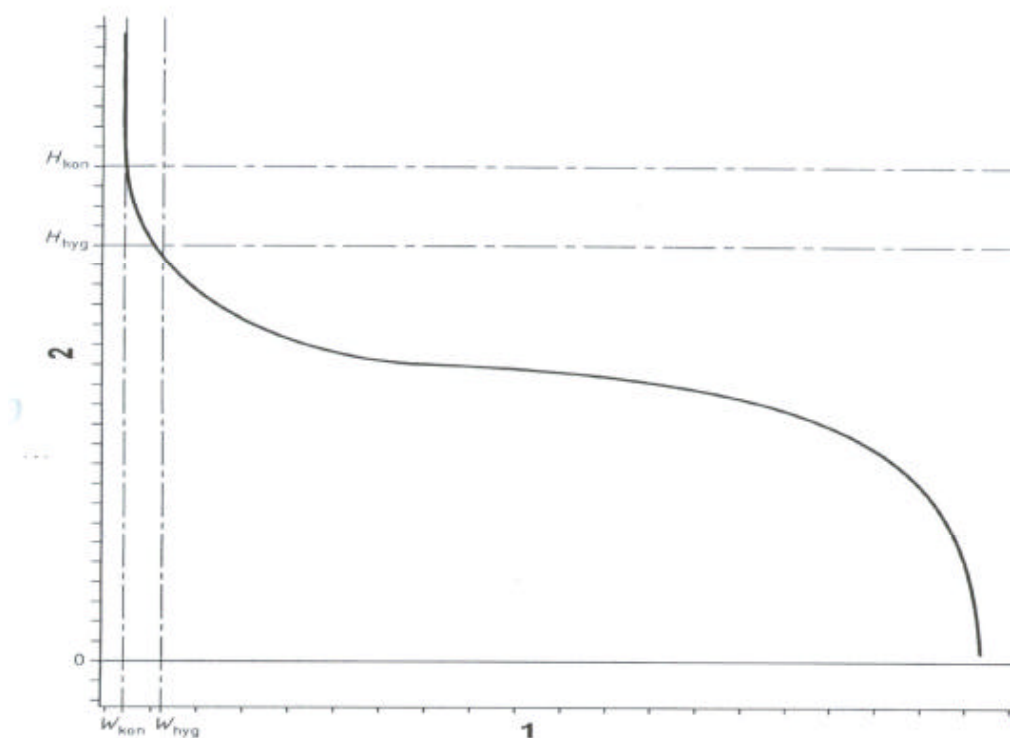
$M_3$  kostean materiaalin massa, kg

$M_4$  kuivan materiaalin massa, kg

$hi$  korkeusero vapaan veden pinnan ja yksittäisen kerroksen keskikohdan välillä, mm

Lopullinen veden imeytymiskorkeus määritettiin kuvaajan avulla, johon piirrettiin eri kerrosten veden imeytymiskorkeus vapaan vedenpinnan yläpuolella suhteessa kerrosten vesipitoisuuteen. Hygroskooppisen veden absorptiokyvyn arvo piirrettiin kuvaajaan vaakasuorana viivana. Esimerkki kuvaajasta on kuvassa 19. Veden imukorkeus ( $H_{kap}$ ) on sen kerroksen keskikorkeus ( $H_{hyg}$  tai  $H_{kon}$ ) vapaan veden pinnan yläpuolella, jossa vesipitoisuus joko leikkaa hygroskooppisen veden absorboituneen vesipitoisuuden viivan ( $W_{hyg}$ ) tai saavuttaa vakiotason ( $W_{kon}$ ). (SFS-EN 1097-10:2003)





Kuva 19: Kuvaaja vedenimeytymiskorkeuden määrittämiseksi  
(SFS-EN 1097-10:2003).

## 5.9. Liukoisuus

### 5.9.1. Kaksivaiheinen ravistelutesti

Kaksivaiheinen ravistelutesti tehtiin mukaillen standardia SFS-EN 12457-3. Standardin mukaan tutkittavaa näytettä piti olla 175 g/koe. Nyt testi tehtiin 100 g näytteellä, koska kevytsoran tiheys oli niin pieni. Muilta osin testi suoritettiin standardin mukaan. (Eerola, 2008)

Standardin mukaan vähintään 95 paino-% tutkittavan näytteen rakeista tulee olla halkaisijaltaan alle 4 mm. Testiä varten tutkittava näyte seulottiin 4 mm seulan läpi. Seulalle jäänyt osa murskattiin Swing-myllyssä ja seulottiin uudelleen. Jos 4 mm seulalle vielä jäi rakeita, ne laitettiin uudelleen Swing-myllyyn. Seulontaa ja murskausta jatkettiin vuorotellen niin kauan, että 4 mm seulalle jäänyt osa oli alle 5 paino-% koko näytteestä. Testin kannalta oli kuitenkin tärkeää, että rakeita ei hienonnettu murskauksessa. Seulonnan jälkeen näytteestä määritettiin vesipitoisuus punnitsemalla näyte ensin normaalitilassa ja sitten kuivattuna. Näyte kuivattiin infrapunakuivaimella. (SFS-EN 12457-3, 2002; Eerola, 2008)



Alkumäärittysten jälkeen näyte laitettiin 500 ml lasiseen ravistelupulloon. Pulloon lisättiin ionivaihdettua vettä niin, että neste-kiinteä –suhteeksi (L/S-suhde) saatiin 2 l/kg ( $\pm 2 \%$ ). Näyte ja vesi sekoitettiin hyvin pullossa, joka sen jälkeen asetettiin ravistelijaan. Ravistelulaitteena käytettiin Heidolph Reax laitetta, joka näkyy kuvassa 20. Ravistelija pyöritti pulloja nopeudella 10 kierrosta minuutissa pystyasennosta  $180^\circ$  niin, että pullot olivat ylösalaisin ja palautuivat sitten takaisin pystyasentoon. (SFS-EN 12457-3, 2002; Eerola, 2008)



Kuva 20: Käytetty ravistelulaite.

Ravistelutestin ensimmäisessä vaiheessa näytettä ravisteltiin 6 tuntia ( $\pm 0,5$  h). Ravisteluajan loputtua syntyneen lietteen annettiin laskeutua 15 minuuttia ( $\pm 5$  min). Lieite suodatettiin  $0,45 \mu\text{m}$  suodatinpaperin läpi. Suodoksesta mitattiin tilavuus, sähkönjohtokyky, lämpötila ja pH. (SFS-EN 12457-3, 2002; Eerola, 2008) Tämän jälkeen suodoksesta analysoitiin aineet As, Sb, Cu, Ni, Zn, Pb, Sn, Co, Cr, Mo, Se, Ba, Hg, Cd ja Cl. Myös fluoridi-, kloridi- ja sulfaattipitoisuudet sekä kokonaisorgaaninen hiili (TOC) määritettiin.

Testin toisessa vaiheessa ensimmäisen suodatuksen sakka ja käytetty suodatinpaperi laitettiin 2000 ml lasiseen ravistelupulloon. Ionivaihdettua vettä lisättiin niin, että L/S-suhteeksi saatiin 8 l/kg ( $\pm 2 \%$ ). Pullot laitettiin takaisin ravistelulaitteeseen ja annettiin pyöriä 18 tuntia ( $\pm 0,5$  h). Lieite suodatettiin samoin kuin ensimmäisessä vaiheessa ja suodoksesta mitattiin samat ominaisuudet ja aineet kuin ensimmäisessä vaiheessa.

(SFS-EN 12457-3, 2002; Eerola, 2008) Kuvassa 21 on kahdesta näytteestä saadut lietteet ja suodatuslaitteisto.



Kuva 21: Syntynyt liete ja suodatuslaitteisto (Eerola, 2008).

Suodoksista määritettiin plasmaemissiospektrometrillä (ICP) alkuaineiden pitoisuudet. Fluoridi-, kloridi- ja sulfaattipitoisuudet sekä TOC määritettiin polttoanalyysillä. Määritykset antavat tuloksen yksikössä mg/l. (Eerola, 2008) Lopulliset tulokset pitää vielä muuttaa vastaamaan liuenneen aineen massaa suhteessa tutkitun näytteen kuivapainoon (mg/kg).

Ensimmäisen ravisteluvaiheen tulokset muutettiin käyttäen hyväksi kaavaa 23 (SFS-EN 12457-3, 2002).

$$A_2 = C_2 \cdot \left[ \frac{L_2}{M_D} + \frac{MC}{100} \right] \quad (23)$$

$A_2$  on liuenut aine L/S-suhteessa 2, mg/kg kuiva-ainetta

$C_2$  tutkittavan aineen konsentraatio L/S-suhteen 2 suodoksessa, mg/l

$L_2$  lisätyn ionivaihdetun veden tilavuus ensimmäisessä vaiheessa, l

$MC$  tutkittavan näytteen kosteusprosentti, %

$M_D$  tutkittavan näytteen kuivapaino, kg

Toisen ravisteluvaiheen tulokset muutettiin kaavalla 24 (SFS-EN 12457-3, 2002), jolla saatiin lopulta liuenneen aineen määrä L/S-suhteessa 10.

$$A_{2-10} = C_2 \cdot \frac{VE_1}{M_D} + C_8 \cdot \left[ \frac{(L_2 + L_8 - VE_1)}{M_D} + \frac{MC}{100} \right] \quad (24)$$

$A_{2-10}$  on liuenneen aineen kumulatiivinen määrä L/S-suhteessa 10, mg/kg kuiva-ainetta

$C_8$  tutkittavan aineen konsentraatio L/S-suhteen 8 suodoksessa, mg/l

$L_8$  lisätyn ionivaihdetun veden tilavuus toisessa vaiheessa, l

$VE_1$  ensimmäisen vaiheen suodoksen tilavuus, l

$MC$  tutkittavan näytteen kosteusprosentti, %

$M_D$  tutkittavan näytteen kuivapaino, kg

### 5.9.2. Läpivirtaustesti ylöspäin

Läpivirtaustesti tehtiin standardin CEN/TS 14405:2004 mukaan. Testissä käytettiin 30 cm korkeaa ja 10 cm halkaisijaltaan olevaa kolonnia, jolloin tutkittavan näytteen rakeista alle 5 % sai olla halkaisijaltaan yli 10 mm. Mikäli yli 10 mm rakeiden osuus oli yli 5 %, piti yli 10 mm rakeet murskata. Kolonniin pakatun näytteen tilavuuden tuli olla 2,4 litraa. (CEN/TS 14405:2004)

Ennen näytteen pakkaamista kolonniin, kolonni kaikkine osineen pestiin 0,1 M HNO<sub>3</sub>-liuoksella. Pesun jälkeen osat kuivattiin ja laitteiston yhteispaino punnittiin tyhjänä. Sekä kolonnin ala-, että yläosaan asetettiin ritilällä tuetut esisuodattimet. Esi-suodattimina käytettiin suodatinta Whatman 3 glass microfibre filter Cat. No. 1003 110, jonka aukko on 6 µm. Tutkittava näyte pakattiin kolonniin kerroksittain. Kerroksia tuli olla vähintään 5, joista jokainen kerros jaettiin vielä 3 osakerrokseen. Osakerrokset tasoitettiin kaikki erikseen kolonniin ja jokainen kerros tiivistettiin pudottamalla 500 g paino kolme kertaa kerroksen päälle 20 cm korkeudelta. Kun kaikki kerrokset oli laitettu kolonniin ja tiivistetty, näytepatsaan korkeuden tuli olla 30 cm ± 5 cm. Näytteen pakkauksen jälkeen, tutkimuslaitteiston muut osat kiinnitettiin paikoilleen ja laitteisto punnittiin. (CEN/TS 14405:2004) Kuvassa 22 on testissä käytetty tutkimuslaitteisto.



Kuva 22: Läpivirtaustestissä käytetty tutkimuslaitteisto. Vasemmalla olevasta pullosta pumpataan liuotinta kevytsorapatsaan läpi. Näytteen läpi tullut suodos kerätään puntarin päällä olevaan astiaan. (Eerola, 2008)

Testin ensimmäinen vaihe oli kyllästää näyte ionivaihdetulla vedellä. Ionivaihdettua vettä syötettiin pumpun avulla kolonniin niin kauan, että koko kolonnissa oleva näyte oli kyllästetty. Kolonnista ulostulevan letkun piti kuitenkin pysyä tyhjänä. Veden pumppaamisen jälkeen näyte jätettiin tasapainottumaan 3 vuorokaudeksi. Tasapainotusjakson jälkeen veden pumppaus käynnistettiin jälleen. Veden virtausnopeus tyhjässä kolonnissa tuli olla  $15 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$  päivässä, mikä 10 cm halkaisijan kolonnille vastaa noin virtausnopeutta 48 ml/h. (CEN/TS 14405:2004)

Pumppauksen aluksi kerättiin pieni, maksimissaan 15 ml, erä suodosta, josta mitattiin pH. Standardin mukaan suodoksen keräysastia tulee pitää inertissä atmosfäärissä eli joko typpi- tai argonatmosfäärissä, jos tämä ensimmäinen pH-arvo on yli 9. Testissä ensimmäisen pienen suodosmäärän pH-arvo oli noin 10, mutta keräysastioita ei pidetty inertissä atmosfäärissä. Astioiden suut oli kuitenkin peitetty muovilla. (CEN/TS 14405:2004; Eerola 2008)

Ensimmäisen pH-mittauksen jälkeen kolonnin ulostuloletku kiinnitettiin varsinaiseen suodoksen keräysastiaan. Suodoksia kerättiin 7 fraktiota. Taulukossa 8 näkyy

standardissa esitetyt vaatimukset, joiden mukaan fraktiot kerättiin. Ensimmäiseen fraktioon lasketaan mukaan pieni erä suodosta, jota käytettiin testin alussa pH:n mittaamiseen. Testin lopussa kaikkien fraktioiden kumulatiivisen L/S-suhteen tuli olla 10. (CEN/TS 14405:2004)

Taulukko 8: Fraktioiden tilavuus ja L/S-suhde vaatimukset (CEN/TS 14405:2004).

Fraktion numero	Fraktion tilavuus [ l ] (=L/S-suhde * kuiva massa)	Kumulatiivinen L/S-suhde [ l/kg kuiva-aine]
1	$(0,1 \pm 0,02) * m_0$	$0,1 \pm 0,02$
2	$(0,1 \pm 0,02) * m_0$	$0,2 \pm 0,04$
3	$(0,3 \pm 0,05) * m_0$	$0,5 \pm 0,08$
4	$(0,5 \pm 0,1) * m_0$	$1,0 \pm 0,15$
5	$(1,0 \pm 0,2) * m_0$	$2,0 \pm 0,3$
6	$(3,0 \pm 0,2) * m_0$	$5,0 \pm 0,4$
7	$(5,0 \pm 0,2) * m_0$	$10,0 \pm 0,1$

Näytteen kuivapitoisuus määritettiin erillisestä näytteestä kuivattamalla näytettä uunissa  $105 \pm 5$  °C lämpötilassa. Erillisen näytteen kuivapitoisuus laskettiin kaavalla 25. Kuivapitoisuuden avulla voitiin määrittää kolonnissa olevan näytteen kuivapaino kaavalla 26. (CEN/TS 14405:2004)

$$w_{dr} = m_d \cdot \frac{100}{m_r} \quad (25)$$

$w_{dr}$  on näytteen kuivapitoisuus, %

$m_d$  näytteen kuiva massa, g

$m_r$  kuivaamattoman näytteen massa, g

$$m_0 = \frac{m \cdot w_{dr}}{100\%} \quad (26)$$

$m_0$  on kolonnissa olevan näytteen kuiva massa, kg

$m$  kolonnissa olevan näytteen (kostea) massa, kg

Jokaisesta fraktiosta analysoitiin suodatuksen jälkeen seuraavat aineet ICP:llä: Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, Hg, Pb ja TOC (Eerola, 2008). Analyysi antaa liuenneiden aineiden määrät yksikössä mg/l. Arvot muutettiin yksikköön mg/kg kuiva-aine kaavan 27 avulla. (CEN/TS 14405:2004)

$$U_i = \frac{V_i \cdot c_i}{m_0} \quad (27)$$

$U_i$  on liuenneen aineen määrä fraktion  $i$  suodoksessa, mg/kg kuiva-aine

$V_i$  fraktion  $i$  suodoksen määrä, l

$c_i$  liuenneen aineen konsentraatio fraktion  $i$  suodoksessa, mg/l

$i$  fraktion numero ( $i= 1,2, \dots 7$ )

Niiden aineiden kohdalla, joissa liuenneen aineen konsentraatio yhden tai useamman fraktion suodoksessa oli pienempi kuin analysointitarkkuus, laskettiin aineille kyseisissä fraktioissa 2 arvoa, minimi- ja maksimiarvot. Maksimiarvo laskettiin käyttämällä  $c_i$ :n arvona analysointitarkkuutta ja minimiarvo sijoittamalla  $c_i$ :n paikalle arvo 0.

Jokaisen tutkittavan aineen kohdalla laskettiin vielä liuenneen aineen kumulatiivinen määrä, joka vastaa aineen liukoisuutta L/S-suhteessa 10. Tämä arvo saatiin summaamalla kaikkien fraktioiden liukoisuudet yhteen. Niiden aineiden kohdalla, joissa analysointitarkkuus tuli vastaan, laskettiin sekä minimi- että maksimiarvo. (CEN/TS 14405:2004)

### **5.9.3. pH-staattinen liukoisuustesti**

pH-staattinen liukoisuustesti tehtiin standardia prCEN/TS 14997:2006 mukaillen. Standardin mukaan liukoisuutta pitäisi tutkia vähintään 8:lla eri pH-arvolla, joista pienimmän tulee olla =4 ja suurimman =12. Tässä työssä tutkittavia pH-arvoja oli alun perin 6 ja ne olivat 4, 6, 8, 10 ja 12, sekä luonnollinen pH. Koetta tehdessä kuitenkin havaittiin, että luonnollinen pH-arvo oli niin lähellä arvoa 10, että tätä pH-arvoa ei enää tutkittu erikseen.

Standardin mukaan yli 95 % tutkittavasta näytteestä tulee olla raekooltaan alle 1 mm, mutta tehdyssä testissä raja-arvona käytettiin 1,18 mm 1 mm sijaan. Jotta näyte saatiin

oikeaan raekokoon, näyte seulottiin 1,18 mm seulan läpi. Seulalle jäänyt osuus murskattiin Swing-myllyllä ja seulottiin uudelleen. Murskausta ja seulontaa jatketaan niin kauan, että 1,18 mm seulalle jäänyt osuus oli alle 5 %. Seulotun näytteen massa oli 191 g.

Seulonnan jälkeen näyte jaettiin 8 osaan, jotka kaikki painoivat 15 g. Kaksi osanäytettä käytettiin esitestiin, jossa määritettiin varsinaisessa kokeessa tarvittavat emäksen ja hapon määrät. Loput osanäytteet käytettiin varsinaisessa testissä.

### Esitesti

Esitestissä käytettävät näytteet punnittiin ja niiden vesipitoisuus määritettiin. Tämän jälkeen näytteet laitettiin 250 ml mittalaseihin, joihin lisättiin ionivaihdettua vettä, niin että L/S-suhteeksi saatiin 9. Veden lisäyksessä otettiin huomioon näytteen vesipitoisuus. Oikean L/S-suhteen saavuttamiseksi lisätty ionivaihdetun veden määrä laskettiin kaavalla 28 (prCEN/TS 14997:2006).

$$V_{L/S9} = 9 \cdot M_d - (M_w - M_d) \quad (28)$$

$V_{L/S9}$  on lisättävän ionivaihdetun veden määrä, jotta L/S-suhde olisi 9, ml

$M_d$  näytteen kuivapaino, g

$M_w$  näytteen massa luonnonkosteana, g

Näytteseoksia sekoitettiin magneettisekoittajalla 60 min, jonka jälkeen näytteen annettiin seistä 10 min. Tämän jälkeen näytteiden luonnollinen pH mitattiin.

Esivalmisteluiden jälkeen toista näytettä alettiin titrata hapolla ja toista emäksellä. Käytetty happo oli 1 molaarista  $\text{HNO}_3$ -liuosta ja käytetty emäs 1 molaarista NaOH-liuosta. Sekä happo- että emästitraus aloitettiin lisäämällä näytteeseen 0,5 ml happoa/emästä, jonka jälkeen seosta sekoitettiin magneettisekoittajalla 30 min. Sekoituksen jälkeen liuoksen pH mitattiin suoraan mittalasista. Ensimmäisen lisäyksen tuloksen perusteella happoa/emästä laitettiin lisää, jonka jälkeen seosta sekoitettiin taas 30 min ja pH mitattiin. Hapon/emäksen lisäystä jatkettiin niin kauan, että happo-lisäyksellä päästiin pH-arvoihin 8, 6 ja 4 ja emäslisäyksellä pH-arvoihin 10 ja 12. (prCEN/TS 14997:2006)

Esitestin perusteella saatiin tietää tarvittavat hapon ja emäksen määrät, jotka tarvittiin kunkin pH-arvon saavuttamiseksi. Lisättävän happo-/emäsluoksen minimikonsentraatio laskettiin kaavoilla 29 ja 30.

$$C_A = \frac{A \cdot M_d}{V_A} \quad (29)$$

$$C_B = \frac{-B \cdot M_d}{V_B} \quad (30)$$

$C_A$  on lisättävän happoliuoksen minimikonsentraatio, mol/l

$C_B$  lisättävän emäsluoksen minimikonsentraatio, mol/l

$A$  hapon kulutus määrätyn pH-arvon saavuttamiseksi, mol H<sup>+</sup>/kg kuiva-ainetta

$B$  emäksen kulutus määrätyn pH-arvon saavuttamiseksi, mol OH<sup>-</sup>/kg kuiva-ainetta

$V_A$  tarvittava hapon määrä, ml

$V_B$  tarvittava emäksen määrä, ml

$M_d$  näytteen kuivapaino, g

Lisättävä hapon/emäksen määrä ei saa kuitenkaan ylittää arvoa  $V_{L/S}$ , joka on sama kuin näytteen kuivapaino.

### Varsinainen testi

Liukoisuus jokaisella tutkittavalla pH-arvolla testattiin omilla näytteillä. Ensin näytettä mitattiin 15 g 250 ml mittalasiin. Näytteestä mitattiin vesipitoisuus ja lisättävän veden määrä laskettiin ottaen huomioon lisättävän hapon/emäksen määrä. Testin lopuksi, kun tarvittava määrä happoa/emästä on lisätty liuokseen, L/S-suhteen tulisi olla 10, ottaen huomioon näytteen alkuperäinen vesipitoisuus. Oikean L/S-suhteen saavuttamiseksi näytteeseen lisättävä liuottimen määrä laskettiin kaavalla 31 (prCEN/TS 14997:2006).



$$V_L = V - \left( \frac{100}{w_{dr}} - 1 \right) \cdot M_d \quad (31)$$

$V_L$  on lisättävän liuottimen määrä, sisältää ionivaihdetun veden ja hapon/emäksen, ml

$V$  lisättävän nesteen kokonaismäärä, sisältäen näytteen kosteuden, ionivaihdetun veden ja happo-/emäslisäyksen, ml

$w_{dr}$  näytteen kuivaosuus näytteen koko massasta, %

$M_d$  näytteen kuivapaino, g

Testin alussa lisättävä ionivaihdetun veden määrä laskettiin kaavoilla 32 ja 33 (prCEN/TS 14997:2006).

$$V_{de\min} = V_L - \frac{A \cdot M_d}{C_A} \quad (32)$$

$$V_{de\min} = V_L - \frac{-B \cdot M_d}{C_B} \quad (33)$$

$V_{de\min}$  on lisättävä ionivaihdetun veden määrä, ml

$V_L$  lisättävän liuottimen määrä, sisältää ionivaihdetun veden ja hapon/emäksen, ml

$A$  hapon kulutus määrätyn pH-arvon saavuttamiseksi, mol  $H^+$ /kg kuiva-ainetta

$B$  emäksen kulutus määrätyn pH-arvon saavuttamiseksi, mol  $OH^-$ /kg kuiva-ainetta

$C_A$  lisättävän happoliuoksen valittu konsentraatio, mol/l

$C_B$  lisättävän emäsliuoksen valittu konsentraatio, mol/l

$M_d$  näytteen kuivapaino, g

Ennen hapon/emäksen lisäyksen aloittamista liuosten pH mitattiin. Sitten liuoksia alettiin titrata. Testissä käytettiin automaattititrausta niin, että laite lisäsi automaattisesti tarvittavan määrän happoa/emästä, jotta asetettu pH-arvo saavutettaisiin tai saataisiin pidettyä yllä. Liuosta sekoitettiin koko mittauksen ajan magneettisekoittajalla ja mittalasi oli peitettynä muovilla. Liuoksen pH ja tarvittu hapon/emäksen määrä mitattiin

ja kirjattiin ylös 4 h, 44 h ja 48 h jälkeen kokeen aloittamisesta. Kokeen loputtua liuoksen annettiin laskeutua  $15 \pm 5$  min. (prCEN/TS 14997:2006) Tämän jälkeen liuos suodatettiin 45 µm membraanipaperin läpi ja suodoksesta analysoitiin ICP:lla Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, Hg ja Pb sekä polttoanalyysillä fluoridi-, kloridi- ja sulfaattiyhdisteet sekä TOC. ICP ja polttoanalyysi antavat aineiden liukoisuudet muodossa mg/l. Liukoisuudet saadaan muutettua muotoon mg/kg kuiva-ainetta kertomalla liukoisuus näytteen L/S-suhteella (prCEN/TS 14997:2006).

## **6. Mittausdata ja muut tutkimustiedot**

### **6.1. maxit Oy Ab:n jatkuvatoiminen prosessimittaus**

maxit Oy Ab:llä on Kuusankosken tehtaalla käytössä jatkuvatoiminen prosessiseuranta. Seuranta mittaa jatkuvatoimisesti erilaisia tuotantoon liittyviä parametreja, kuten esimerkiksi uuniin syötettävää raaka-ainemäärää, käytetyn polttoaineen määrää, lämpötiloja uunin eri osissa ja lopputuotteen tiheyttä. Myös tuotannossa syntyviä savukaasuja analysoidaan jatkuvalla mittauksella.

Tässä työssä tutkittujen kevytsoranäytteiden hienokuona- ja saviöljyosuudet on laskettu käyttäen hyväksi jatkuvatoimisen mittauksen tuloksia. Myös näytteiden irtotiheys on määritetty mittausten tuloksista.

### **6.2. Päästömittaukset maxit Oy Ab:n Kuusankosken tehtaalla**

Jatkuvatoimisen päästömittauksen lisäksi maxit Oy Ab teettää aika ajoin päästömittauksia ulkopuolisella mittaajalla. Tällöin savukaasuista määritetään myös raskasmetallit, joita jatkuvatoimisella mittauksella ei pystytä määrittämään. Hienokuonan lisäyksen vaikutusta tuotannon savukaasuihin selvitettiin Nab Labs Oy:n tekemällä ilmanpäästömittauksella viikolla 21 vuonna 2008. Kyseisen mittauksen aikana kevytsoran tuotantoprosessiin syötettiin hienokuonaa 900 kg/h, joka vastasi noin 3 prosenttia uuniin menevästä koko raaka-ainemäärästä tunnissa. Saviöljyn määrä oli normaali eli noin 0,7 % raaka-aineseoksesta. Päästömittauksessa mitattiin ennen ja jälkeen savukaasupesurin seuraavat parametrit: kiintoaine, O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>-, CO-, SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>-, TOC-, HCl-, HF-, PCPP/F- ja raskasmetallipitoisuudet. (Nab Labs Oy, 2008; Rätty 2008)

### **6.3. Kevytsoran lämmönjohtavuuden tutkimukset**

maxit Oy Ab on tehnyt Norjan tutkimusyksikössään mittauksia vuonna 2007 Kuusankoskella vuonna 2006 tuotetun kevytsoran lämmönjohtavuusominaisuuksista. Näytteistä on selvitetty rakeisuuskäyrä, tiheys ja lämmönjohtavuus. (Pöysti, 2008)

Näytteiden tiheys määritettiin Thaulow-astialla ja tiheyden arvona käytettiin 5 mittauksen keskiarvoa. Näytteiden lämmönjohtavuus mitattiin standardien EN 12667 ja EN 14063-1 mukaan Heat Flow Meter -laitteella. Ennen lämmönjohtavuuden mittausta

tutkittavat näytteet kuivattiin uunissa 105 °C lämpötilassa. Kuivauksen jälkeen näytteiden annettiin jäähtyä huonelämmössä vähintään yksi päivä. (Pöysti, 2008)

Lämmönjohtavuuden tutkiminen on kallista ja aikaa vievää. Norjassa tehtyjen tutkimusten tarkoituksena on löytää malli, jonka avulla kevytsoran lämmönjohtavuutta voitaisiin luotettavasti arvioida rakeisuuskäyrän ja tiheyden avulla, joita on helppo ja halpa mitata. (Pöysti, 2008)

## **7. Laboratoriotutkimusten tulokset**

### **7.1. Mineralogia- ja rakennetarkastelut**

#### ***7.1.1. Röntgendiffraktometria***

Röntgendiffraktometrillä selvitettiin minkälaisista aineista ja yhdisteistä tutkittavat näytteet koostuivat. Kaikki muut näytteet tutkittiin paitsi näyte 1, joka sisälsi 3 % hienokuonaa ja 0,7 % saviöljyä. Röntgendiffraktometrin tuottamat laboratorioraportit ovat liitteessä 1 kuvissa 1–6. Kuvateksteissä on näytteen numeron jälkeen ilmoitettu suluissa, kuinka monta prosenttia rumpu-uunin määssä syötteessä oli hienokuonaa ja kuinka paljon saviöljyä.

#### ***7.1.2. Optiset mikroskooppikuvat***

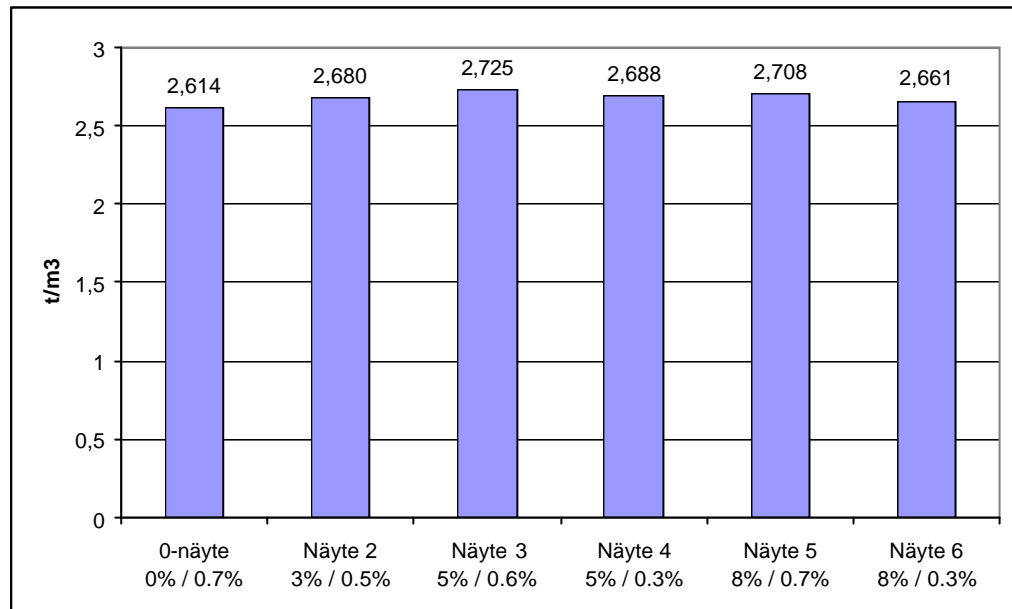
Optisella mikroskoopilla tutkittiin 0-näytettä sekä näytettä 6, joka sisälsi 8 % hienokuonaa ja 0,3 % saviöljyä. Liitteen 2 kuvissa 1–10 on optisella mikroskoopilla saatuja kuvia. Yhdellä sivulla on aina allekkain 0-näytteen ja näytteen 6 kuvat vertailun helpottamiseksi. Kuvien mittakaava on ilmoitettu kuvissa.

#### ***7.1.3. SEM-kuvat***

SEM-laitteella tutkittiin 0-näytteen sekä näytteiden 2–6 ainekoostumusta. Mikroskopoinnilla pyrittiin erityisesti löytämään kupari- ja arseeniyhdistepartikkeleita. Näytteiden SEM-kuvia ja analysointituloksia on esitetty liitteessä 3 kuvissa 1–8 ja taulukoissa 1–8.

## 7.2. Kiintotiheys

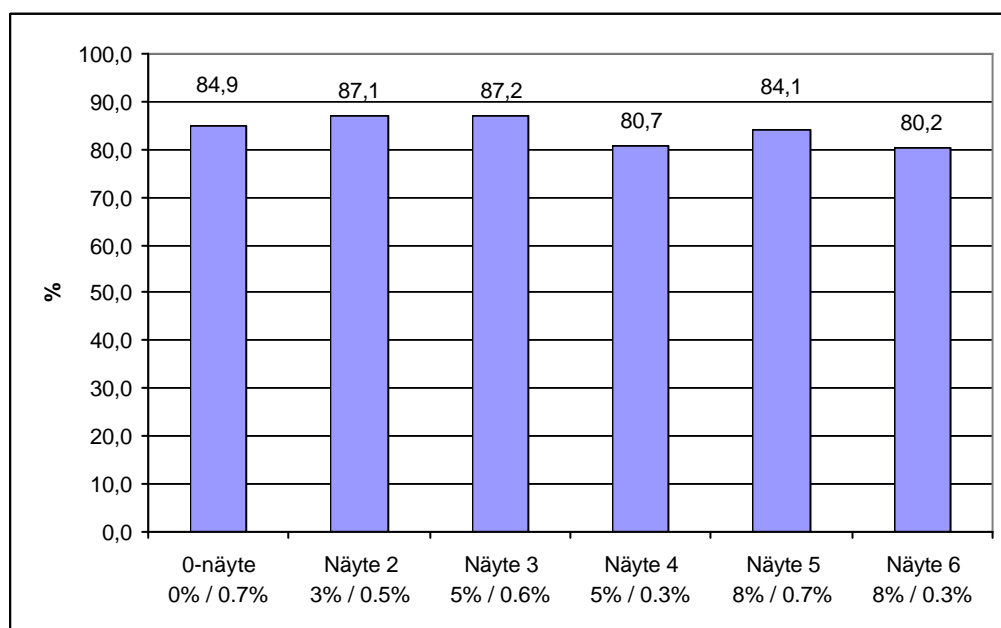
Kiintotiheys määritettiin kaasupyknometrillä kaikille muille näytteille, paitsi näytteelle 1. Saadut tulokset on esitetty kuvaajassa 2.



Kuvaaja 2: Kaasupyknometrillä määritetyt kiintotiheydet.

## 7.3. Huokoisuus

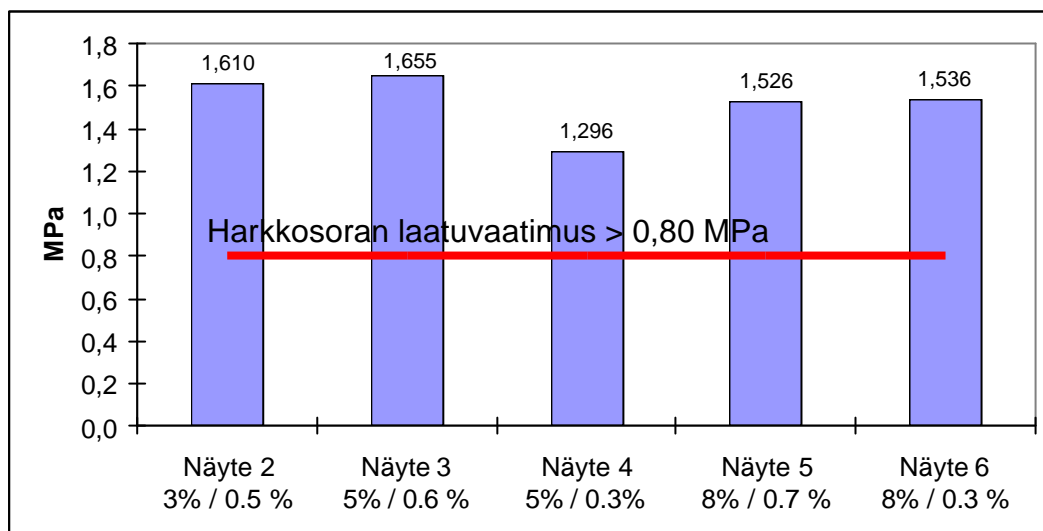
Näytteiden huokoisuus määritettiin kaikille muille näytteille paitsi näytteelle 1. Kuvaajassa 3 on esitetty saadut tulokset.



Kuvaaja 3: Näytteiden kokonaishuokostilavuus.

## 7.4. Murskautuvuus

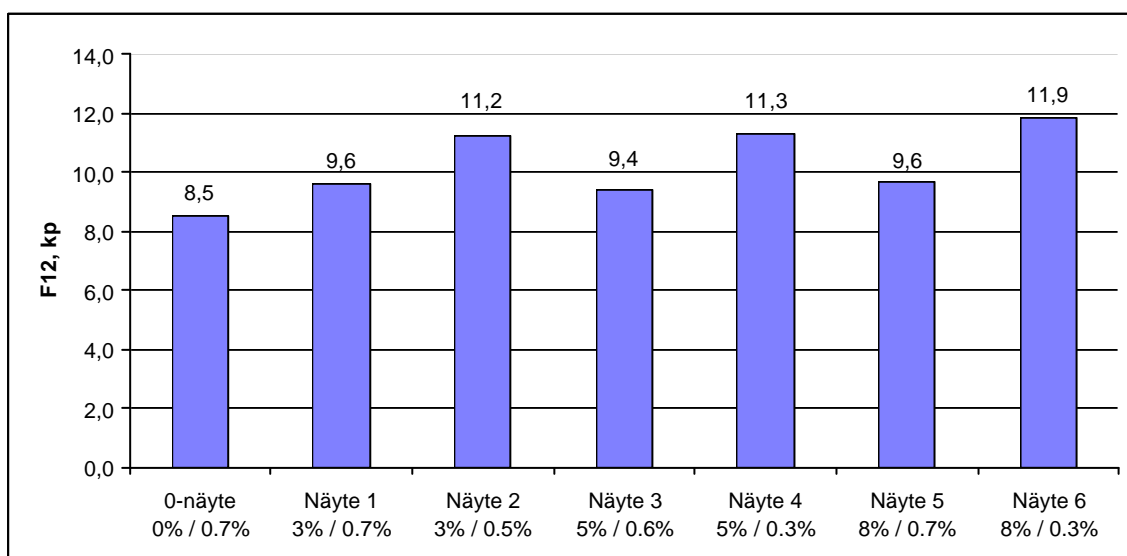
Kevytsorapatsaan murskautuvuus määritettiin näytteille 2–6 ja tulokset näkyvät kuvaajassa 4. Kyseinen testi tehdään pääasiassa harkkosoralle, jonka raekoko on 4–8 mm. 0-näytteelle testiä ei tehty, mutta kuvaajassa näkyy harkkosoran laatuvaatimusarvo, joka on 0,8 MPa.



Kuvaaja 4: Kevytsoranäytteiden murskautuvuus.

## 7.5. Yksittäisen rakeen puristusmurtolujuus

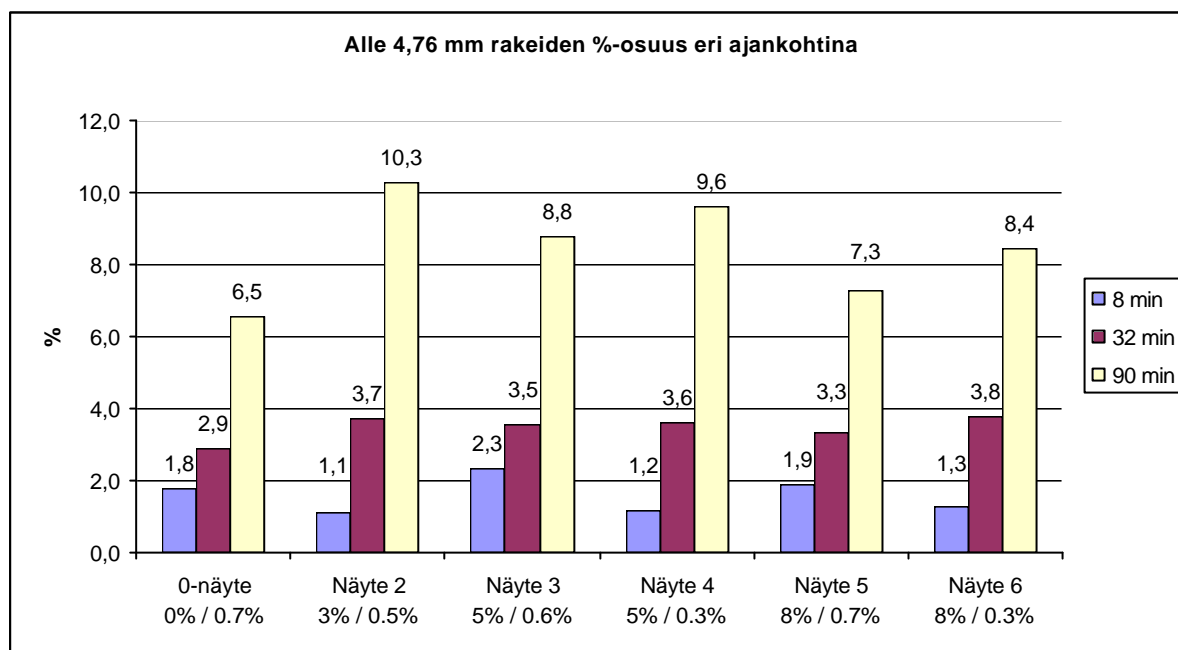
Yksittäisen rakeen puristusmurtolujuutta tutkittiin kylmäpuristuskokeella. Koe tehtiin kaikille näytteille ja tulokset on esitetty kuvaajassa 5. Puristusmurtolujuudet määritettiin 10 rakeen lujuuksien keskiarvona, joka on muutettu vastaamaan halkaisijaltaan 12 mm raetta.



Kuvaaja 5: Rakeiden puristusmurtolujuudet kilopondeina.

## 7.6. Rakeiden hiertyminen

Rakeiden hiertymistä tutkittiin mukaillulla Tumbler-testillä ja testi tehtiin kaikille muille näytteille paitsi näytteelle 1. Kuvaajassa 6 on esitetty näytteistä hiertyneen aineksen määrä painoprosentteina kokeen eri vaiheissa.



Kuvaaja 6: Hiertyneen aineksen osuus painoprosentteina kokeen eri vaiheissa.

## 7.7. Veden kapillaarinen nousukorkeus

Veden kapillaarinen nousukorkeus määritettiin näytteelle 5 käsittelemättömänä ja lisääineella käsiteltynä. Testin kesto oli molempien näytteiden kohdalla 28 vuorokautta ja molempien näytteiden raekoko oli 4–20 mm. Taulukossa 9 on esitetty testin tulokset. Kapillaarikatkona toimivan kevytsoran vaatimuksena on, että veden kapillaarinen nousukorkeus on pienempi kuin 75 mm.

Taulukko 9: Veden kapillaarisen nousukorkeuden testissä saadut tulokset.

	Tiivistetty irtotiheys kg/m <sup>3</sup>	Absorboitunut kosteus g/m <sup>2</sup>	Kosteus- prosentti %	H(hyg) mm	H(kap) mm
Näyte 5	390,4	14,1	10,3	0,8	>225
Näyte 5 + pinnoite	375,2	6,1	4,7	0,2	30



## **7.8. Liukoisuus**

### **7.8.1. Kaksivaiheinen ravistelutesti**

Kaksivaiheinen ravistelutesti tehtiin kaikille muille näytteille, paitsi näytteelle 1. Kokeen tulokset on esitetty liitteen 4 taulukoissa 1–4. Taulukossa 1 on esitetty näytteen märkä- ja kuivapaino, vesipitoisuus, lisätyn ionivaihdetun veden määrä sekä suodostilavuus. Taulukossa on myös suodosten pH, johtokyky ja lämpötila. Taulukoissa 2 ja 3 on kerrottu koeolosuhteet ja kokeessa käytetyt laitteet. Taulukossa 4 on analysoitujen aineiden pitoisuudet suodoksessa (mg/l) sekä lasketut pitoisuusarvot kuiva-ainetta kohti (mg/kg). Taulukossa on myös ilmoitettu aineiden raja-arvot eri kaatopaikka-luokituksissa.

### **7.8.2. Läpivirtaustesti ylöspäin**

Läpivirtaustesti ylöspäin tehtiin näytteelle 1, joka sisälsi 3 % hienokuonaa ja 0,7 % saviöljyä. Liitteen 5 taulukossa 1 on kerrottu näytteen lähtötietoja, taulukossa 2 fraktioiden mittaustuloksia ja taulukossa 3 fraktioiden L/S-suhteet. Taulukossa 4 on esitetty tutkittujen aineiden mitatut pitoisuudet eri fraktioissa sekä yksikköön mg/kg kuiva-aine muutetut pitoisuudet. Kaikille aineille paitsi TOC:lle on laskettu sekä minimi- että maksimiliukoisuusarvot. Taulukossa näkyvät myös fraktioiden yhteenlasketut aineiden pitoisuudet sekä eri kaatopaikkojen liukoisuusraja-arvot.

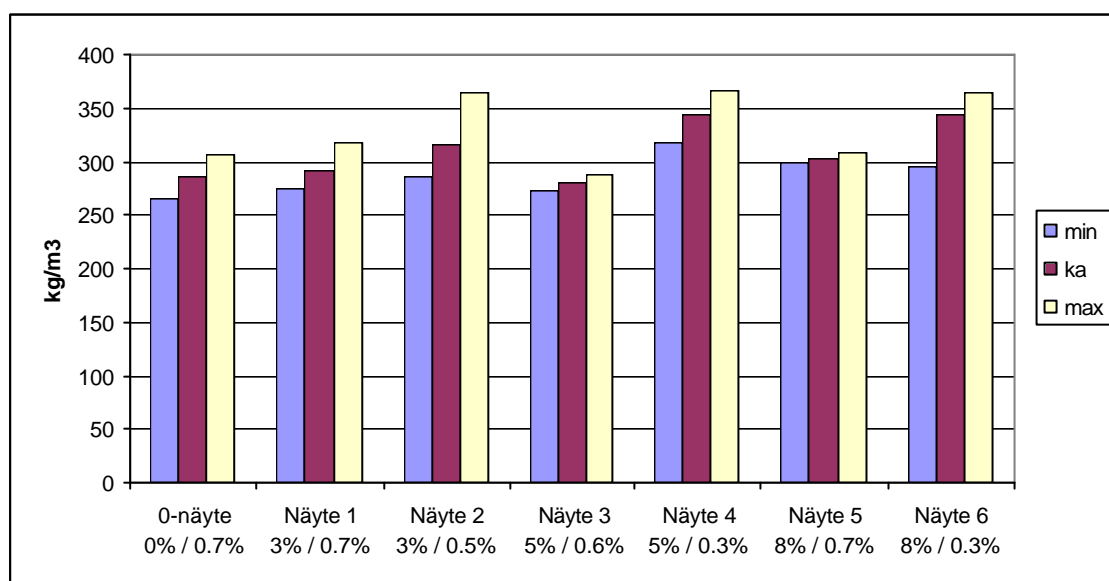
### **7.8.3. pH-staattinen liukoisuuskoe**

pH-staattinen koe tehtiin näytteelle 5, joka sisälsi 8 % hienokuonaa ja 0,7 % saviöljyä. Tutkitun näytteen luonnollinen pH oli noin 10 ja aineiden liukoisuutta tutkittiin pH-arvoissa 4, 6, 8, 10 ja 12. Liitteen 6 taulukoissa 1 ja 2, sekä kuvissa 1 ja 2 on esitetty esitestin tulokset ja sen perusteella saatu hapon ja emäksen kulutus. Taulukossa 3 on esitetty analysoitujen aineiden liukoisuudet eri pH-arvoilla. Kuvaajiin 1–4 on piirretty joidenkin aineiden ja yhdisteiden liukoisuudet.

## 8. Muut tutkimustulokset

### 8.1. Irtokuivatiheys

Irtokuivatiheys määritettiin kaikille näytteille maxit Oy Ab:n prosessimittausdatan avulla. Prosessiseuranta listaa mitattavien parametrien arvot tunnin välein. Näytteiden irtokuivatiheydet on laskettu niiden tuntien irtokuivatiheyksien keskiarvona, jolloin kutakin näytettä valmistettiin. Kuvaajassa 7 on esitetty näytteiden irtokuivatiheyden keskiarvot sekä minimi- ja maksimiarvot.



Kuvaaja 7: Näytteiden irtokuivatiheyden keskiarvo, minimiarvo ja maksimiarvo.

### 8.2. Savukaasut

Savukaasumittaukset tehtiin näytteellä 1, jossa oli noin 3 % hienokuonaa ja 0,7 % saviöljyä. Taulukoissa 10–12 on esitetty mittauksen tuloksia. Tulokset on muutettu vastaamaan 6 % O<sub>2</sub>-pitoisuudessa olevaa, kuivaa savukaasua. Taulukoissa ilmoitetut raja-arvot on määrätty maxit Oy Ab:n ympäristöluvassa, joka oli voimassa mittauksen aikana. (Räty, 2008)

Taulukossa 10 on esitetty savukaasujen hiukkas- ja happipitoisuus ennen ja jälkeen pesurin. maxit Oy Ab:n mittausten aikana voimassa olleessa ympäristöluvassa hiukkas-päästöjen raja-arvoksi on määrätty 45 mg/m<sup>3</sup>n ilman happireduktiota.

Taulukko 10:Hiukkaspitoisuudet (mg/m<sup>3</sup>n) ja happipitoisuudet (%) kuivassa savukaasussa (Räty, 2008).

	5/2008 Ennen pesuria (min-max)	5/2008 Pesurin jälkeen (min-max)
<b>Hiukkaset</b>	50 (48-52)	19 (17-20)
<b>O<sub>2</sub></b>	13,4	13,4

Taulukossa 11 on esitetty savukaasujen SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>-, HCl-, HF-, CO- ja raskasmetallipitoisuus (mg/m<sup>3</sup>n) sekä TOC-pitoisuus hienokuona-ajon aikana mitattuna ennen ja jälkeen savukaasupesurin sekä maxit Oy Ab:n ympäristöluvassa annetut raja-arvot.

Taulukko 11:SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>-, HCl-, HF-, CO- ja raskasmetallipitoisuus (mg/m<sup>3</sup>n) sekä TOC-pitoisuus (mg C/m<sup>3</sup>n) kuivassa savukaasussa (Räty, 2008).

	5/2008 Ennen pesuria	5/2008 Pesurin jälkeen	Raja-arvo
<b>SO<sub>2</sub></b>	1098	725	350
<b>NO<sub>x</sub></b>	657	602	450 (tavoite)
<b>HCl</b>	140	< 1	100
<b>HF</b>	80	3	40
<b>TOC</b>	330	456	20
<b>CO</b>	1416	1482	450
<b>Cd ja Tl yht.</b>	0,025	0,012	0,05
<b>Hg</b>	0,016	0,013	0,05
<b>Sb, As, Co, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, V yht.</b>	0,314	0,08	0,5

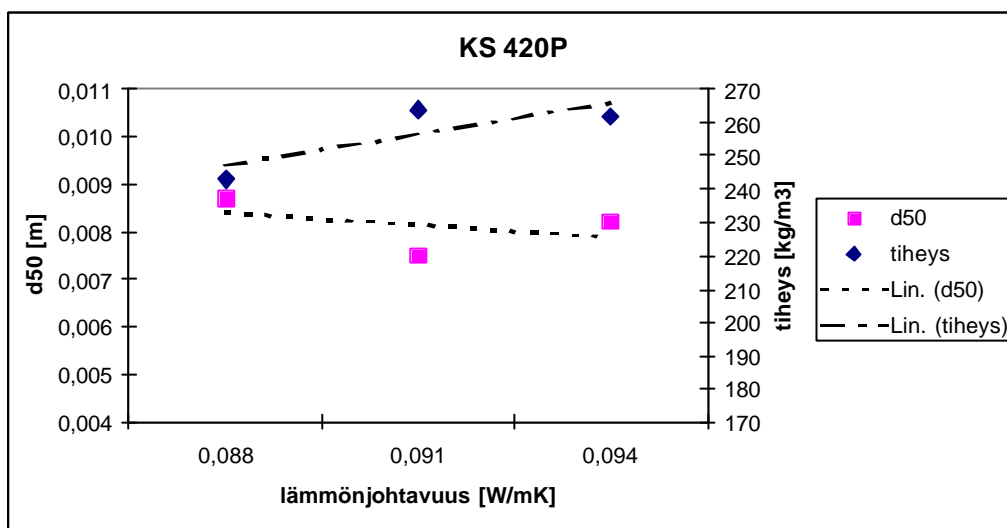
Dioksiini- ja furaanipitoisuudet ennen ja jälkeen savukaasupesurin sekä maxit Oy Ab:n ympäristöluvassa annettu raja-arvo on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12:Dioksiini- ja furaanipitoisuudet (PCDD/F, I-TEQ ng/m<sup>3</sup>n) kuivassa savukaasussa (Räty, 2008).

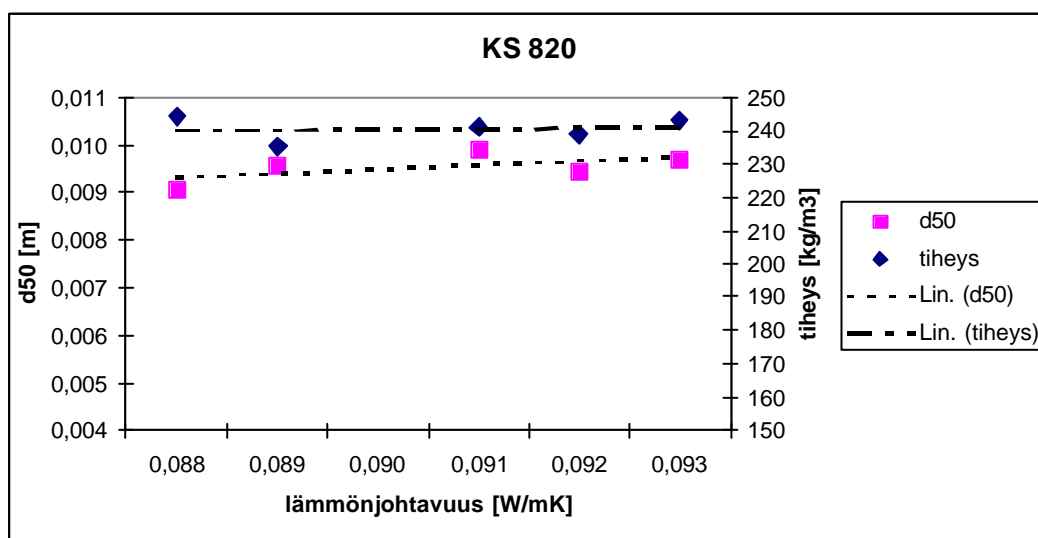
	5/2008 Ennen pesuria	5/2008 Pesurin jälkeen	Raja-arvo
<b>PDDD/F</b>	0,013	0,032	0,1

### 8.3. Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuutta on tutkittu kahdella näytesarjalla, jotka poikkeavat toisistaan raekooltaan. Toinen tutkittava sarja oli raekooltaan 8-20 mm ja toinen 4-20 mm. Tutkitut näytteet ovat maxit Oy Ab:n tuotannosta vuonna 2006 otettuja näytteitä. Mitattuja lämmönjohtavuusarvoja verrattiin näytteiden tiheyteen ja keskiraekokoon  $d_{50}$ . Kuvaajaan 8 on piirretty KS420 ja kuvaajaan 9 KS820 tiheydet ja keskiraekoot lämmönjohtavuuden funktiona. Kuvaajiin on piirretty myös lineaariset trendiviivat.



Kuvaaja 8: KS420 tiheydet ja keskiraekoot lämmönjohtavuuden funktiona.



Kuvaaja 9: KS820 tiheydet ja keskiraekoot lämmönjohtavuuden funktiona.

## 9. Aikaisemmat tutkimukset

### 9.1. Kevytsoralla tehdyt liukoisuustestit

maxit Oy Ab on teettänyt vuonna 2004 Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy:llä kolonni-testin (NEN 7343), jolla tutkittiin kevytsoran liukoisuusominaisuuksia. Halkaisijaltaan 50 mm olevaan kolonniin asetetun kevytsorapatsaan korkeus oli noin 200 mm ja paino 218,3 g. Kolonnin läpi pumpattiin milli-Q-vettä, jonka pH oli säädetty arvoon 4. Kolonnin toisesta päästä kerättiin 7 erikokoista fraktiota, jotka suodatettiin ennen analysointia 0,45 µm suodattimen läpi. Fraktioista määritettiin pH ja sähkönjohtavuus sekä analysoitiin eri aineiden pitoisuuksia. (Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy, 2004) Analysoitujen parametrien kumulatiivinen liukoisuusarvo on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13: Kolonnitestin fraktioiden K1-K7 kumulatiivinen tulos L/S 10  
(Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy, 2004).

Aine/Yhdiste	Lyhenne	Pitoisuus mg/kg	Pysyvän jätteen kaatopaikan raja-arvo
Alumiini	Al	9,8	
Antimoni	Sb	0,0125	0,06
Arseeni	Ar	0,28	0,5
Barium	Ba	0,026	20
Boori	B	0,23	
Elohopea	Hg	0,00082	0,01
Fosfori	P	0,0348	
Kadmium	Cd	0,00023	0,04
Kalium	K	13,9	
Kalsium	Ca	176	
Koboltti	Co	0,00036	
Kromi	Cr	0,0098	0,5
Kupari	Cu	0,011	2
Litium	Li	0,27	
Lyijy	Pb	0,00024	0,5
Magnesium	Mg	6,8	
Mangaani	Mn	0,00085	
Molybdeeni	Mo	0,098	0,5
Natrium	Na	29	
Nikkeli	Ni	0,0043	0,4
Rauta	Fe	0,0042	
Rikki	S	27	
Sinkki	Zn	0,0055	4
Strontium	Sr	0,33	
Titaani	Ti	0,00245	
Vanadiini	V	0,47	
Sulfaatti	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	85	1000

Taulukossa esitetyistä tuloksista nähdään, että mikään tutkittu aine tai yhdiste ei ylitä pysyvän jätteen kaatopaikalle asetettuja liukoisuusraja-arvoja.

## 9.2. Hienokuonalla tehtyt liukoisuustestit

Hienokuonan liukoisuusominaisuuksia on tutkittu mm. Miia Kiviön diplomityössä, jonka aiheena on Kuparinsulatuskuonien hyötykäyttö. Diplomityö on tehty vuonna 2006 Teknillisen korkeakoulun Materiaalitekniikan osastolle. Työssä on tutkittu hienokuonan liukoisuusominaisuuksia kaksivaiheisella ravistelutestillä (SFS-EN 12457/3). Testin parametreja on esitetty taulukossa 14 ja tulokset taulukossa 15. Tulokset, jotka on merkitty \*-merkillä, on analysoitu grafiittiuunilla, muut tulokset ICP:llä.

Taulukko 14: Hienokuonalla tehdyn kaksivaiheisen ravistelutestin parametreja  
(Kiviö,2006).

	L/S	Näytteen kosteus %	Näyte kuiva g	Lisäty vesi mL	Suodos pH	Suodos johtokyky μS/cm	Suodos T °C	Suodos tilavuus mL
Hieno- kuona	2	0,09	175,4	351	8,76	157,9	23,9	320
	8			1403	8,69	19,93	23,7	1380

Taulukko 15: Hienokuonalla tehdyn kaksivaiheisen ravistelutestin tulokset  
(Kiviö, 2006).

Aine/Yhdiste	Lyhenne	6h suodos L/S 2, mg/l	18h suodos L/S 8, mg/l	Kumulatiivinen liukoisuus, L/S 10, mg/kg	Pysyvän jätteen kaatopaikan raja-arvo mg/kg
Antimoni	Sb	0,07*	0,046*	0,5	0,06
Arseeni	As	0,226*	0,235*	2,33	0,5
Barium	Ba	<0,1	<0,1	<1,0	20
Elohopea	Hg	<0,2	<0,2	<2,0	0,01
Kadmium	Cd	<0,05	<0,1	<1,0	0,04
Koboltti	Co	<0,1	<0,1	<1,0	
Kromi	Cr	<0,1	<0,2	<2,0	0,5
Kupari	Cu	0,15	<0,1	1,06	2
Lyijy	Pb	0,0141*	0,057*	0,49	0,5
Molybdeeni	Mo	0,53	0,049*	1,37	0,5
Nikkeli	Ni	<0,01*	<0,01*	<0,1	0,4
Seleen	Se	0,004*	0,016*	0,14	
Sinkki	Zn	0,12	<0,1	1,01	4
Tina	Sn	<0,2	<0,2	<2,0	
Fluoridi	F-	<5	6,1	60	
Kloridi	Cl-	<5	<5	<50	
Sulfaatti	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	46	9	155	1000
Orgaaninen hiili	DOC		7,7		

Taulukosta nähdään, että arseenin, antimonin, molybdeenin, seleenin ja fluoridiyhdisteiden liukoisuudet ylittävät pysyvän jätteen raja-arvot. Näistä arseenin liukoisuus on itse asiassa ongelmajätteen luokkaa. Elohopean, kadmiumin ja kromin kohdalla liukoisuuden määritystarkkuus ei ole ollut riittävä kaatopaikkaluokituksen tekoon. Koboltille ja tinalle ei ole annettu raja-arvoja. Muiden aineiden kohdalla liukoisuusarvot ovat pysyvän jätteen rajoissa.

### 9.3. maxit Oy Ab:n Kuusankosken tehtaalla tehdyt päästömittaukset

maxit Oy Ab:n Kuusankosken kevytsorastehtaalla päästömittauksia on tehty ainakin vuoden 2005 huhti- ja marraskuussa sekä 2004 vuoden joulukuussa. Taulukoissa 16–18 on esitetty näiden mittauksen tuloksia. Taulukossa 16 on esitetty savukaasujen hiukkas- ja happipitoisuus. Taulukossa 17 on savukaasujen SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>-, HCl-, HF-, CO-, TOC- ja raskasmetallipitoisuuksia. Taulukossa 18 on savukaasujen dioksiini- ja furaanipitoisuudet.

Taulukko 16: Eri ajankohtina tehtyjen päästömittausten savukaasujen hiukkas- pitoisuudet (mg/m<sup>3</sup>n) ja happipitoisuudet (%) kuivassa savukaasussa (Räty, 2008).

	11/2005 Ennen pesuria (min-max)	11/2005 Pesurin jälkeen (min-max)	4/2005 Ennen pesuria (min-max)	4/2005 Pesurin jälkeen (min-max)	12/2004 Ennen pesuria (min-max)	12/2004 Pesurin jälkeen (min-max)
<b>Hiukkaset</b>	32 (30-34)	<b>7</b> <b>(6-9)</b>	14 (13-15)	<b>7</b> <b>(6-8)</b>	29	<b>11</b>
<b>O<sub>2</sub></b>	12,7 (12,4- 13,1)	<b>12,7</b> <b>(12,2-13,5)</b>	12,9 (12,8-13,0)	<b>13,2</b> <b>(12,6-13,7)</b>	12,1	<b>12,4</b>

Taulukko 17: Eri ajankohtina tehtyjen päästömittausten savukaasujen SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>-, HCl-, HF-, CO- ja raskasmetallipitoisuudet (mg/m<sup>3</sup>n) sekä TOC-pitoisuudet (mg C/m<sup>3</sup>n) (Räty, 2008).

	<b>11/2005 Pesurin jälkeen</b>	<b>4/2005 Pesurin jälkeen</b>	<b>12/2004 Pesurin jälkeen</b>
<b>SO<sub>2</sub></b>	739	725	615
<b>NO<sub>x</sub></b>	587	728	759
<b>HCl</b>	0,6	0,7	2
<b>HF</b>	4	5,3	3
<b>TOC</b>	254	331	-
<b>CO</b>	1143	995	1052
<b>Cd ja Tl yht.</b>	0,007	0,004	-
<b>Hg</b>	0,002	0,008	-
<b>Sb, As, Co, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, V yht.</b>	0,112	0,037	-

Taulukko 18: Eri ajankohtina tehtyjen päästömittausten savukaasujen dioksiini- ja furaanipitoisuudet (PCDD/F, I-TEQ ng/m<sup>3</sup>n) kuivassa savukaasussa (Räty, 2008).

	<b>11/2005 Pesurin jälkeen</b>	<b>4/2005 Pesurin jälkeen</b>	<b>12/2004 Pesurin jälkeen</b>
<b>PDDD/F</b>	0,021	0,025	-



## 10. Tulosten analysointi

### 10.1. Mineralogia- ja rakennetarkastelut

#### 10.1.1. Röntgendiffraktometria

Röntgendiffraktorimetrin tulokset olivat hyvin samanlaisia kaikilla näytteillä. 0-näytteestä löydettiin kolme faasia, jotka olivat kvartsi ( $\text{SiO}_2$ ), rautasilikaatti eli fajaliitti, ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) ja anortiitti ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ). Samat faasit löytyivät myös kaikista hienokuonaa sisältävistä näytteistä. Näytteestä 2 löydettiin eniten eri faaseja. Edellä mainittujen lisäksi löytyi maghemiittia ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), rautasulfaattia ( $\text{FeSO}_4$ ), bernaliittia ( $\text{Fe}^+_3(\text{OH})_3$ ), ferrosiliittia ( $\text{FeSiO}_3$ ) ja herkyniittia ( $\text{Fe}^+\text{Al}_2\text{O}_4$ ). Näytteestä 3 löydettiin 0-näytteen sisältämien faasien lisäksi maghemiittia ja herkyniittia. Näytteessä 4 oli maghemiittia, herkyniittia ja rautasulfaattia. Näytteistä 5 ja 6 löytyi perusfaasien lisäksi maghemiittia, herkyniittia ja bernaliittia, joista osa on kuitenkin muodostunut kevytsoran valmistuksen jälkeen, kun näytteitä on säilytetty ilmassa.

Hienokuonan lisääminen raaka-aineseokseen tuottaa kevytsora-lopputuotteeseen pääasiassa lisää erilaisia rautayhdisteitä, mitä siinä ei esiinny ilman hienokuonaa. Saviöljyn määrän vähentämisellä ei voida todeta olleen paljoakaan merkitystä syntyneisiin yhdisteisiin.

#### 10.1.2. Optiset mikroskooppikuvat

Optisen mikroskopoinnin tarkoituksena oli tarkastella sitä, miten hienokuonan lisääminen raaka-aineseokseen vaikuttaa kevytsorarakkeen koostumukseen ja kuoren paksuuteen. Optisella mikroskoopilla tutkittiin 0-näytettä ja näytettä 6.

Kuvien perusteella rakeen kuoren paksuudesta on vaikea tehdä johtopäätöksiä. Hienokuonaa sisältävän näytteen koostumus lähellä rakeen reunaa vaikuttaisi kuitenkin olevan tiheämpi kuin 0-näytteen. 0-näytteessä huokokset ovat suurempia ja niitä on vähemmän kuin hienokuonaa sisältävässä näytteessä, jossa huokokset ovat pieniä ja niitä on paljon.

Tulosten tulkinnan kannalta olisi ollut järkevämpää tutkia näytteen 6, jossa oli puolet normaalista saviöljymäärästä, sijaan näytettä 5, jossa oli normaali määrä saviöljyä, eli

0,7 %. Tässä tapauksessa kuvissa havaitut eroavaisuudet olisi voitu tulkita johtuneeksi suoraan hienokuonan lisäämisestä. Nyt erot voivat yhtä hyvin johtua saviöljyn määrän vähentämisestä.

### **10.1.3. SEM-kuvat**

SEM-analyysin tavoitteena oli löytää etenkin kupari- ja arseenipartikkeleiden olo-  
muodot näytteissä. Kuparia löytyi näytteistä 5 ja 6, ja arseenia vain näytteestä 5. Tämä  
ei kuitenkaan tarkoita sitä, että kuparia ja arseenia ei olisi muissa näytteissä, niitä vain ei  
löydetty riittävän suurina pitoisuuksina. Näytteessä 6 kupari esiintyi mm. kuparikiisuna.  
Näytteessä 5 kupari esiintyi osana mm. lasifaasia, kuparikiisuna sekä yhdisteenä, jossa  
oli mm. nikkeliä ja arseenia.

## **10.2. Kiintotiheys**

Kuvaajassa 2 sivulla 62 on esitetty kaasupyknometrillä saadut näytteiden kiintotiheydet.  
Kuvaajasta nähdään, että kaikkien hienokuonaa sisältävien näytteiden kiintotiheys on  
hiukan korkeampi kuin 0-näytteen, laskennallisesti ne ovat 1,5–4,3 % 0-näytteen kiinto-  
tiheyttä suurempia.

Näytepareissa B ja C enemmän saviöljyä sisältävien näytteiden kiintotiheys on hieman  
korkeampi kuin saman määrän hienokuonaa, mutta vähemmän saviöljyä sisältävän  
näytteen. Näyteparissa C on enemmän hienokuonaa kuin näyteparissa B, mutta kiinto-  
tiheydet ovat silti hieman näyteparin B tiheyksiä pienempiä.

Kiintotiheys määräytyy tuotteen syntyainesten tiheyden mukaan. Hienokuonan kiinto-  
tiheys on noin  $3,985 \text{ t/m}^3$  ja raskaan polttoöljyn tiheys noin  $1 \text{ t/m}^3$ . Luonnon kivennäis-  
maalajien kiintotiheys vaihtelee välillä  $2,6\text{--}2,8 \text{ t/m}^3$ . Näin ollen voisi kuvitella, että mitä  
enemmän hienokuonaa näyte sisältää sitä suurempi on sen kiintotiheys. Näin ei  
kuitenkaan ole näyteparin C kohdalla, jonka kiintotiheydet ovat pienempiä kuin näyte-  
parin B kiintotiheydet, vaikka näyteparissa C on enemmän hienokuonaa. Mittauksia  
tehtiin kuitenkin vain yksi jokaiselle näytteelle, joten kyseessä voi olla poikkeus tai  
häiriö mittauksessa. Toinen vaihtoehto on, että hienokuonan lisääminen ei lisää  
kiintotiheyttä lineaarisesti, vaan hienokuonan osuuden ylittäessä tietyn pisteen kiinto-  
tiheydet alkavatkin laskea. Saviöljyn vähentäminen kuitenkin vaikuttaisi laskevan  
näytteiden kiintotiheyttä.

### **10.3. Huokoisuus**

Kuvaajassa 3 sivulla 62 on esitetty näytteiden huokoisuudet. Näytteiden 2 ja 3 huokoisuus on jonkin verran suurempi kuin 0-näytteen, muiden näytteiden huokoisuus on pienempi kuin 0-näytteen. Näytteen 5 huokoisuus on kuitenkin lähes sama kuin 0-näytteen. Näytepareissa B ja C huokosten määrä on selvästi pienentynyt, kun saviöljyn osuutta on vähennetty.

On mahdollista, että alle 8 % hienokuonalisäys raaka-aineeseen nostaa kevytsoran huokostilavuutta hiukan, kun saviöljyn määrä pidetään normaalina. Saviöljyn määrällä näyttäisi kuitenkin olevan hienokuonaa suurempi vaikutus kevytsoran huokoisuuteen.

### **10.4. Murskautuvuus**

Kuvaajassa 4 sivulla 63 on esitetty näytteiden murskautuvuuden arvot. Tuloksista nähdään, että kaikki näytteet täyttävät harkkosoran laatuvaatimuksen, joka on 0,8 MPa, ilman ongelmia. Näytteiden murskautuvuusarvot ovat hyvin lähellä toisiaan, ainoastaan näytteen 4 murskautuvuus on jostain syystä alhaisempi kuin muiden. Koska 0-näytettä ei tutkittu, ei voida sanoa, parantaako hienokuona kevytsoran puristusmurtolujuutta vai pienentääkö se sitä. Tuloksien perusteella voidaan kuitenkin todeta, että hienokuona ei ainakaan pienennä kevytsoran lujuutta haitallisen paljon.

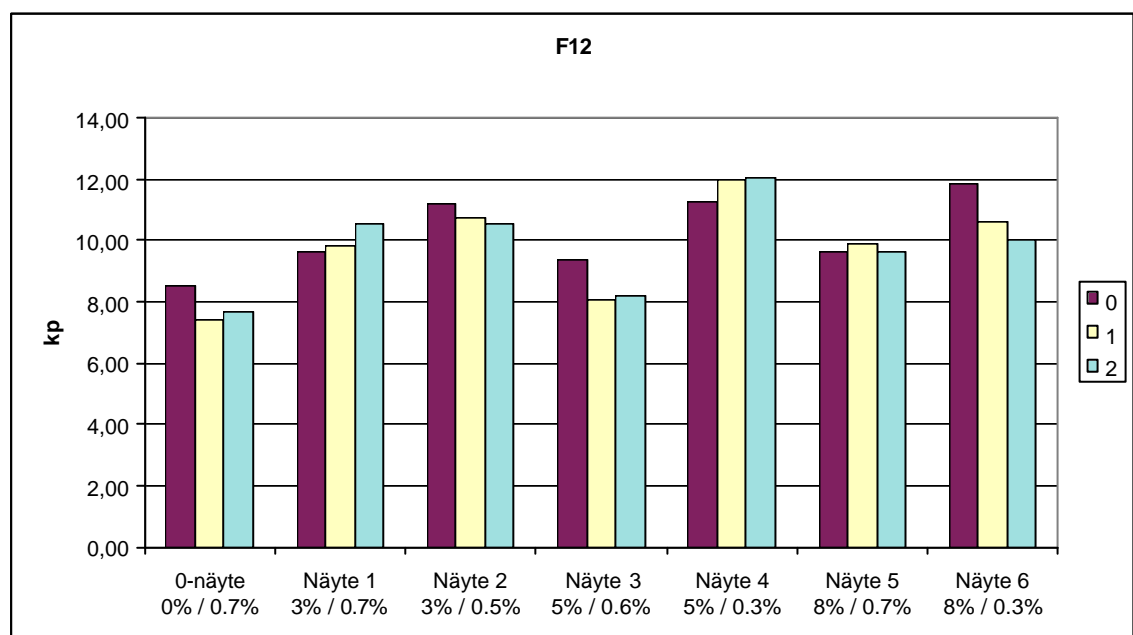
Näytteen 4 murtolujuus, joka oli selvästi pienempi kuin muiden näytteiden, voi viitata siihen, että saviöljymäärän vähentäminen vaikuttaisi lujuutta pienentävästi. Samaa ilmiötä ei kuitenkaan ole havaittavissa näytteen 6 kohdalla, joten näytteen 4 pienempi lujuusarvo voi johtua myös mittausvirheestä. Toisaalta murskautuvuuden arvo lasketaan näytteelle 3 kokeen keskiarvona ja näytteen 4 kohdalla kaikista kolmesta kokeesta saatiin selvästi muita kokeita pienempiä arvoja. Tämä voi johtua systemaattisesta virheestä, mutta on myös mahdollista, että näytteen 4 tuotantovaiheessa on tapahtunut jotain poikkeavuuksia tai pääraaka-aineena ollut savi on jostain syystä ollut heikkoa laatusempaa kuin muiden näytteiden tuotantovaiheessa.

### **10.5. Yksittäisen rakeen puristusmurtolujuus**

Kuvaajassa 5 sivulla 63 on esitetty näytteiden yksittäisten rakeiden puristusmurtolujuudet. Tuloksista nähdään, että kaikki hienokuonaa sisältävien näytteiden rakeiden puristusmurtolujuudet ovat suurempia kuin 0-näytteen. Näyteparien A, B ja C tuloksista

nähdään, että saviöljyn määrän laskeminen parantaa hienokuonaa sisältävien näytteiden lujuutta selvästi. Kun verrataan näytteiden 2, 4 ja 6 lujuusarvoja keskenään, huomataan, että arvot ovat lähes samat kaikilla näytteillä. Sama ilmiö voidaan nähdä näytteiden 1, 3 ja 5 lujuusarvojen välillä. Yksittäisen rakeen puristusmurtolujuuden kannalta ei siis ole merkitystä lisätäkö hienokuonaa prosessiin 3, 5 vai 8 prosenttia raaka-aineesta, jos sitä kuitenkin lisätään. Saviöljyn määrällä taas näyttäisi olevan merkitystä.

Puristusmurtolujuudet määritettiin 10 rakeen lujuuksien keskiarvona, joka on muutettu vastaamaan halkaisijaltaan 12 mm rietta. Jokaisella näytteelle yksittäisten puristuskokeiden tulokset vaihtelivat suuresti. Kuvaajaan 10 on piirretty näytteiden puristusmurtolujuudet kolmessa tapauksessa: palkki ”0” kuvaa puristusmurtolujuuksia, kun arvo on laskettu kaikkien 10 yksittäisen kokeen tuloksen keskiarvona, palkki ”1” kuvaa lujuuksia, kun keskiarvosta on jätetty suurin ja pienin yksittäinen tulos pois ja palkki ”2” kuvaa lujuuksia, kun keskiarvoista on jätetty 2 suurinta ja 2 pienintä arvoa pois.



Kuvaaja 10: Yksittäisten rakeiden puristusmurtolujuuksien arvot, kun keskiarvon laskentaan on käytetty kaikki tulokset (0), kun on jätetty suurin ja pienin arvo pois (1) ja kun on jätetty 2 suurinta ja 2 pienintä arvoa pois (2).

Kun puristusmurtolujuus lasketaan jättämällä joko 1 tai 2 suurinta ja pienintä yksittäistä arvoa pois keskiarvon laskennasta, näyteparien A ja C sisällä arvot lähestyvät toisiaan, eli saviöljyn määrän vaikutus vähenee. Näyteparin B sisällä arvojen erotus kuitenkin suurenee. Taulukossa 19 on esitetty tulosten keskihajonta eri keskiarvon laskutavoilla.

Taulukko 19: Tulosten keskihajonta, kun keskiarvo on laskettu jättäen pois 0, 1 tai 2 suurinta ja pienintä arvoa.

	Keskihajonta [kp]		
Näyte	0	1	2
0-näyte 0% / 0.7%	5,14	2,28	1,49
Näyte 1 3% / 0.7%	4,49	3,22	2,03
Näyte 2 3% / 0.5%	5,99	3,31	1,82
Näyte 3 5% / 0.6%	7,19	4,50	1,51
Näyte 4 5% / 0.3%	3,60	2,54	2,00
Näyte 5 8% / 0.7%	4,28	4,48	2,20
Näyte 6 8% / 0.3%	7,35	3,76	2,45

Tulosten keskihajonta on varsin suurta, kun tuloksen laskentaan on käytetty kaikkien 10 yksittäisen kokeen tulokset. Keskihajonta pienenee merkittävästi, kun tuloksen laskennasta jätetään suurin ja pienin yksittäinen tulos pois, paitsi näytteen 5 kohdalla, jossa keskihajonta itse asiassa kasvaa hiukan. Keskihajonta pienenee edelleen kun tuloksen laskennasta jätetään 2 suurinta ja 2 pienintä arvoa pois. Toinen asia on, onko 4 yksittäisen kokeen tuloksen pois jättäminen 10:stä enää mielekästä. Jos tuloksesta haluttaisiin tarkempi, tulisi yksittäisiä puristuskokeita tehdä lisää.

## 10.6. Rakeiden hiertyminen

Kuvaajassa 6 sivulla 64 on esitetty näytteiden hiertyneen massan osuudet kokeen eri aikoina. Ensimmäisen pysäytyksen jälkeen, eli 8 minuutin pyöriksen jälkeen, ne näytteet, joissa oli normaalimäärä saviöljyä, hiertyivät lähes yhtä paljon tai hiukan enemmän kuin 0-näyte. Näytteet, joissa saviöljyä oli noin puolet normaalista, hiertyivät selvästi vähemmän kuin 0-näyte. Toisen pysäytyksen, eli 32 minuutin pyöriksen jälkeen, kaikista hienokuonaa sisältävistä näytteistä riippumatta saviöljyn määrästä on hiertynyt lähes sama määrä, joka on selvästi enemmän kuin 0-näytteellä. Kokeen lopussa, eli 90 minuutin pyöriksen jälkeen, kaikista hienokuonaa sisältävistä näytteistä on hiertynyt enemmän materiaalia kuin 0-näytteestä. Näytepareista B ja C nähdään, että saviöljyä vähemmän sisältävät näytteet ovat hiertyneet enemmän kuin ne, joissa on normaali määrä saviöljyä.

Hienokuonan lisääminen kevytsoraan lisää kevytsoran hiertymistä jonkin verran. Saviöljyn määrän vähentäminen näyttäisi aluksi vähentävän murskautuvuutta, mutta lopuksi lisäävän sitä.

## **10.7. Veden kapillaarinen nousukorkeus**

Taulukossa 9 sivulla 64 on esitetty veden kapillaarisen nousukorkeuden testistä saadut tulokset. Pinnoittamattomassa näytteessä vesi nousee kapillaarisesti näyteputken ylälaitaan asti eli niin korkealle kuin näytettä vain riittää. Pinnoitetussa näytteessä veden kapillaarinen nousukorkeus on 30 mm. Kapillaarisena katkona käytettävän kevytsoran veden kapillaarisen nousukorkeuden raja-arvo on 75 mm. Pinnoitettu kevytsora täyttää siis reilusti vaatimuksen, kun pinnoittamaton vettyy täysin. Tulos on tyypillinen kevytsoralle. Hienokuonan lisääminen ei siis muuta veden kapillaarista nousukorkeutta kevytsorassa, eikä haittaa tuotteen pinnoittamista.

## **10.8. Liukoisuus**

### ***10.8.1. Kaksivaiheinen ravistelutesti***

Kaksivaiheisen ravistelukokeen tulokset on esitetty liitteen 4 taulukoissa 1–4, sekä kuvissa 1–4. Tutkitut aineet analysoitiin ICP:llä. Analysointitarkkuus oli kaatopaikkaluokitusta varten riittämätön aineiden Cr, Ni, Se, Cd, Sb, Hg, Pb ja fluoridiyhdisteiden kohdalla. Co, Cu, Zn, Sn, Ba ja klooriyhdisteiden kohdalla voidaan todeta, että liukoisuudet ovat sallituissa rajoissa; tosin Co:lle ja Sn:lle ei ole määritetty kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvoja. Muita johtopäätöksiä aineiden liukoisuuksista ei voida tehdä riittämättömän analysointitarkkuuden vuoksi.

Arseenin ja molybdeenin kohdalla analysointitarkkuus oli liian pieni 0-näytteelle, mutta riitti hienokuonaa sisältäville näytteille, sillä niistä kyseisiä aineita liukeni enemmän. TOC:n ja sulfaattiyhdisteiden liukoisuuksien määrittämisessä analysointitarkkuus on ollut riittävä. Tarkempia johtopäätöksiä voidaan siis tehdä arseenin, molybdeenin, TOC:n ja sulfaattiyhdisteiden kohdalla.

Liukoisuustuloksista nähdään, että arseenin ja molybdeenin liukoisuudet ylittävät pysyvän jätteen kaatopaikan liukoisuusraja-arvot kaikkien hienokuonaa sisältävien näytteiden kohdalla. Raja-arvo ylittyy myös 0-näytteellä, mutta se johtuu todennäköisesti riittämättömästä analysointitarkkuudesta. Molempien aineiden kohdalla pätee

se, että mitä enemmän hienokuonaa on lisätty raaka-aineen sekaan, sitä enemmän aineita liukenee. Saviöljyn määrän vähentäminen nostaa arseenin liukoisuutta, mutta laskee molybdeenin liukoisuutta. Arseenin liukoisuus oli näytteillä 4, 5 ja 6 jopa suurempi kuin puhtaalla hienokuonalla. Molybdeenin liukoisuus oli näytteellä 5 suurempi kuin puhtaalla hienokuonalla.

Myös sulfaattiyhdisteiden kohdalla yhdisteitä liukeni sitä enemmän mitä enemmän hienokuonaa oli lisätty kevytsoraan. Liunneen orgaanisen hiilen määrä hienokuonaa sisältävillä näytteillä oli kuitenkin vain noin neljännes 0-näytteestä liunneesta määrästä. Näytepareissa B ja C orgaanista hiiltä liukeni hieman enemmän normaalin määrän saviöljyä sisältävistä näytteistä kuin näytteistä, joissa oli noin puolet normaalista saviöljymäärästä. Liunneen orgaanisen hiilen määrä ei kuitenkaan ole millään näytteellä lähelläkään pysyvän jätteen kaatopaikan raja-arvoa, vaan on reilusti alle sen.

### ***10.8.2. Läpivirtaustesti ylöspäin***

Läpivirtaustesti tehtiin näytteelle 1. Testin tulokset on esitetty liitteessä 5.

Pysyvälle jätteelle eri aineiden liukoisuusarvot tulee virallisesti määrittää läpivirtaustestin avulla. Eri kaatopaikkaluokitusten raja-arvot on annettu läpivirtaustestille L/S-suhteessa 10. (Ympäristöhallinto, 2006) Koska läpivirtaustestin suorittaminen vie paljon aikaa, tutkittiin hienokuonaa sisältävien kevytsoranäytteiden liukoisuutta pääasiassa kaksivaiheisella ravistelutestillä, joka on huomattavasti läpivirtaustestiä nopeampi. Läpivirtaustesti tehtiin kuitenkin yhdelle näytteelle, jotta saataisiin vertailupohjaa läpivirtaustestin ja kaksivaiheisen ravistelutestin tulosten välille ja näin myös kaksivaiheisen ravistelutestin ja eri kaatopaikkaluokitusten raja-arvojen välille.

Läpivirtaustesti tehtiin näytteelle 1, jolle ei kuitenkaan ole tehty kaksivaiheista ravistelutestiä. Läpivirtaustestin tuloksia voidaan kuitenkin verrata näytteen 2 ravistelutestin tuloksiin. Näytteen 1 ja 2 ero on se, että näytteessä 1 on saviöljyä 0,7 % kun näytteessä 2 saviöljyä on 0,5 %. Molemmissa näytteissä on hienokuonaa 3 %. Kun näytteiden liukoisuuksia L/S-suhteessa 10 verrataan toisiinsa, nähdään, että tulokset ovat hyvin samansuuruisia. Taulukossa 20 on verrattu joidenkin tutkittujen aineiden liukoisuuksia näytteillä 1 ja 2.

Taulukko 20: 2-vaiheisen ravistelutestin ja läpivirtaustestien tulosten vertailua  
L/S-suhteessa 10.

	Ni	Cu	As	Se	Mo	TOC	Yksikkö	L/S
2-vaiheinen ravistelutesti näyte 2	1,00	0,50	1,82	2,00	1,17	9,45	mg/kg kuiva-aine	10
Läpivirtaustesti näyte 1	0 - 1,00	0 - 1,00	0,63 - 2,01	0 - 1,50	0,26 - 1,26	36,24	mg/kg kuiva-aine	10

Läpivirtaustestissä aineille on määritetty sekä minimi- että maksimiarvot, koska analysointitarkkuus ei ole ollut riittävän tarkan arvon määrittämiseen kaikilla fraktioilla, paitsi TOC:n kohdalla. Taulukosta 20 nähdään, että kaksivaiheisen ravistelutestin ja läpivirtaustestin tulokset näytteillä 1 ja 2 ovat hyvin linjassa, kaksivaiheisen ravistelutestin tulokset osuvat pääsääntöisesti läpivirtaustestin tulosvälille. Ainoastaan TOC:n arvo läpivirtauskokeessa on selvästi kaksivaiheisen ravistelutestin arvoa suurempi, mutta arvo on silti reippaasti pysyvän jätteen kaatopaikan raja-arvoa alhaisempi. Taulukkoa tarkasteltaessa tulee kuitenkin muistaa se, että myös kaksivaiheisen ravistelutestin tulokset ovat pitoisuuksien maksimiarvoja analysointitarkkuuden vuoksi muilla kuin arseenilla, molybdeenillä ja TOC:llä. Näin ollen myös seleenin kaksivaiheisen ravistelutestin tulos voi todellisuudessa hyvinkin osua läpivirtaustestin tulosvälille, vaikka sen maksimiarvo on yli läpivirtaustestin maksimin.

Kun verrataan läpivirtaustestin tulosta kaatopaikkaluokituksen raja-arvoihin, voidaan todeta sama kuin kaksivaiheisen ravistelutestin tuloksilla: Analysointitarkkuus on suurimmalla osalla tutkituista aineista liian epätarkka luokituksen tekemiseen. Arseenin ja molybdeenin osalta tarkkuus on riittävä ja näiden aineiden liukoisuudet ylittävät pysyvän jätteen kaatopaikan raja-arvot. Molybdeenin läpivirtauskokeen minimiarvo on tosin pienempi kuin pysyvän jätteen kaatopaikan raja-arvo, mutta tämä johtuu taas todennäköisesti analysointitarkkuuksista.

### ***10.8.3. pH-staattinen liukoisuustesti***

pH-staattisen liukoisuuskokeen tulokset on esitetty liitteessä 6. Liitteen kuvaajiin 3-6 on piirretty kloridi- ja sulfaattiyhdisteiden, sekä koboltin ja arseenin liukoisuudet eri pH-arvoilla. Koboltin ja arseenin kuvaajia tarkasteltaessa pitää ottaa huomioon, että arvot ovat pitoisuuksien suurimpia mahdollisia arvoja, jotka määräytyvät analyysitarkkuuden perusteella. Analysointitarkkuus vaihtelee saman aineen tai yhdisteen kohdalla eri pH-



arvoilla. Arseenilla vain pH-arvossa 10 on saatu tarkka liukoisuusarvo. Kloridi- ja sulfaattiyhdisteiden kuvaajissa arvot ovat tarkkoja.

Tuloksista nähdään, että kobolttia, nikkeliä ja kuparia liukenee enemmän pH-arvossa 4 kuin näytteen luonnollisessa pH-arvossa 10. Sinkkiä liukenee enemmän pH-arvossa 6 kuin pH-arvossa 10, mutta myös enemmän kuin pH-arvossa 4. Arsenia liukenee pH-arvossa 10 enemmän kuin pH-arvoissa 4 ja 6. Molybdeenia liukenee enemmän pH-arvossa 10 kuin pH-arvossa 4. Klooriyhdisteiden liukoisuudet vaihtelevat epäloogisesti. Sulfaattiyhdisteiden liukoisuus on suurimmillaan pH-arvossa 8 ja pienenee pH:n muuttuessa siitä kumpaan tahansa suuntaan. Aineiden Cr, Se, Cd, Ba, Hg ja Pb liukoisuuksista eri pH-arvoissa ei voida päätellä mitään riittämättömän ja liian vaihtelevan analysointitarkkuuden vuoksi. Kokeen tulokset ovat kyseenalaisia, eikä testille sen vuoksi voi antaa paljon painoarvoa.

## 10.9. Irtokuivatiheys

Kuvaajassa 7 sivulla 66 on esitetty näytteen irtokuivatiheyksien keskiarvo sekä minimi- ja maksimiarvot. Näytteissä 1, 3 ja 5 on kaikissa normaali määrä saviöljyä. Näytteen 1 ja 5 irtokuivatiheydet ovat jonkin verran 0-näytteen tiheyttä suurempia, näytteen 3 taas hiukan 0-näytteen tiheyttä pienempi. Erot 0-näytteeseen ovat kuitenkin hyvin pieniä. Näytteillä 3 ja 5 minimi- ja maksimiarvot ovat lähempänä keskiarvoa kuin 0-näytteellä ja näytteellä 1. Näytteen, joissa on puolet normaalista saviöljyn määrästä, irtokuivatiheydet ovat selvästi suurempia kuin 0-näytteen. Samalla irtokuivatiheyden arvojen vaihteluväli kasvaa.

Tulosten perusteella näyttää siltä, että 3 % hienokuonalisäys ei vaikuta irtokuivatiheyksiin lähes mitenkään, kun saviöljyn määrä pidetään normaalina. Kun hienokuonalisäys on 5 % tai 8 % ja saviöljyn määrä pidetään normaalina, hienokuonalla näyttäisi olevan tiheyksien vaihteluväliä pienentävä vaikutus. Irtokuivatiheydet nousevat vasta, kun hienokuonalisäyksen lisäksi saviöljyn määrää vähennetään, joten saviöljyn määrällä on hienokuonaa suurempi merkitys näytteen irtokuivatiheyksien arvoihin.

Irtokuivatiheyksien arvot on laskettu automaattisen prosessiseurannan mittaustuloksista niiden tuntien irtokuivatiheyksien keskiarvona, jona kutakin näytettä on valmistettu. Näytteitä valmistettiin eripituisia jaksoja. Kun raaka-aineseoksen syöttöreseptiä

muutetaan, voi ensimmäisissä tuloksissa olla vielä vanhan reseptin tuotetta mukana ja viimeisissä tuloksissa jo uuden reseptin tuotetta, joten ensimmäisten ja viimeisten tuntien tuloksia ei voida huomioida irtokuivatiheyksien laskennassa. Taulukossa 21 on esitetty tuntimäärä jokaiselle näytteelle, jonka mukaan keskiarvo on laskettu.

Taulukko 21: Tuntimäärä, jonka mukaan irtokuivatiheyksien arvot on laskettu.

	0-näyte 0% / 0.7%	Näyte 1 3% / 0.7%	Näyte 2 3% / 0.5%	Näyte 3 5% / 0.6%	Näyte 4 5% / 0.3%	Näyte 5 8% / 0.7%	Näyte 6 8% / 0.3%
t [h]	24	21	21	8	14	6	14

Näytteiden 3 ja 5 irtokuivatiheyden laskennassa on ollut käytettävissä vain 6 ja 8 tuntia. Yksittäisten tulosten vähäinen määrä saattaa selittää tiheyksien pienen vaihteluvälin. Jos näytteitä olisi valmistettu pidempään, irtokuivatiheydet olisivat mahdollisesti alkaneet vaihdella enemmän, joten hienokuonan vaikutuksesta irtokuivatiheyksien arvojen vaihtelujen tasaamiseen on vaikea tehdä luotettavaa johtopäätöstä.

## 10.10. Lämmönjohtavuus

Hienokuonaa sisältävillä kevytsoranäytteillä ei tehty lämmönjohtavuuskokeita sen vuoksi, että näytteitä ei ollut riittävää määrää testiä varten. maxit Oy Ab on tehnyt vuonna 2007 tutkimuksia kevytsoranäytteillä selvittääkseen, voidaanko kevytsoran tiheydestä tai raekokojakaumasta päätellä luotettavasti lämmönjohtavuuden arvoja. Kuvaajissa 8 ja 9 sivulla 68 on esitetty kevytsoran tiheyden ja keskirakeen suhteita lämmönjohtavuuteen. Näistä kahdesta taulukosta voidaan nähdä, että näytteiden tiheys vaikuttaisi kasvavan lämmönjohtavuuden kasvaessa. Keskiraekoko taas laskee toisella näytesarjalla ja kasvaa toisella lämmönjohtavuuden kasvaessa. Tulosten perusteella voidaan olettaa, että kevytsoran tiheyden kasvaessa kevytsoran lämmönjohtavuus kasvaa. Hienokuona nostaa kevytsoran tiheyttä jonkin verran, joten voidaan olettaa, että hienokuonan lisääminen voisi nostaa lämmönjohtavuutta.

Tiheyden ja lämmönjohtavuuden yhteys on kuitenkin aika heikko. Luotettavampaa analyysia varten lämmönjohtavuuden mittauksia pitäisi tehdä lisää. Kuvaajissa 8 ja 9 on oletettu, että tiheyden ja keskiraekoon suhteet lämmönjohtavuuteen olisi lineaarisia ja on hyvin mahdollista, että ne eivät ole lineaarisia.

Kevytsoran lämmönjohtavuus riippuu myös jossakin määrin kevytsoran huokoisuudesta. Kevytsora on täynnä suljettuja ilmahuokosia. Ilma on itsessään hyvä lämmöneriste, joten voisi olettaa, että mitä enemmän kevytsorarakkeissa on huokosia, sitä pienempi on lämmönjohtavuuden arvo.

Hienokuonaa sisältävien näytteiden huokoisuustestausten sekä irtokuivatiheyksien määrittysten perusteella voidaan arvioida, että verrattuna 0-näytteeseen lämmönjohtavuuden arvo saattaisi kasvaa näytteillä 4 ja 6 ja laskea näytteellä 3. Näytteiden 4 ja 6 huokoisuus on pienempi ja irtokuivatiheys suurempi kuin 0-näytteen, kun näytteen 3 huokoisuus on suurempi ja irtokuivatiheys pienempi kuin 0-näytteen.

### 10.11. Savukaasut

Hienokuonan vaikutusta kevytsoran valmistusprosessissa syntyviin savukaasuihin haluttiin tutkia. Tätä varten tehtiin päästömittaus toukokuussa 2008 samalla, kun prosessiin syötettiin hienokuonaa 900 kg/h, mikä vastasi noin 3 % koko raaka-aineseoksesta. Tämän päästömittauksen tuloksia on verrattu alla aikaisemmin tehtyihin mittauksiin.

Taulukosta 22 nähdään, että hienokuona-ajon aikana tehdyssä ilmanpäästömittauksessa savukaasujen hiukkaspäästöt olivat hiukan aikaisempien mittausten päästöjä korkeampia sekä ennen että jälkeen pesurin. maxit Oy Ab:n vielä voimassa olevassa ympäristöluvassa hiukkaspäästöjen raja-arvoksi on määrätty 45 mg/m<sup>3</sup>n ilman happireduktiota.

Taulukko 22: Hiukkaspitoisuudet (mg/m<sup>3</sup>n) ja happipitoisuudet (%) kuivassa savukaasussa (Räty, 2008).

	5/2008 Ennen pesuria (min-max)	<b>5/2008 Pesurin jälkeen (min-max)</b>	11/2005 Ennen pesuria (min-max)	<b>11/2005 Pesurin jälkeen (min-max)</b>	4/2005 Ennen pesuria (min-max)	<b>4/2005 Pesurin jälkeen (min-max)</b>	12/2004 Ennen pesuria (min-max)	<b>12/2004 Pesurin jälkeen (min-max)</b>
<b>Hiukkaset</b>	50 (48-52)	<b>19 (17-20)</b>	32 (30-34)	<b>7 (6-9)</b>	14 (13-15)	<b>7 (6-8)</b>	29	<b>11</b>
<b>O<sub>2</sub></b>	13,4	<b>13,4</b>	12,7 (12,4-13,1)	<b>12,7 (12,2-13,5)</b>	12,9 (12,8-13,0)	<b>13,2 (12,6-13,7)</b>	12,1	<b>12,4</b>

Taulukossa 23 on verrattu hienokuona-ajon aikana mitattuja SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>-, HCl-, HF-, CO-, TOC- ja raskasmetallipitoisuuksia aikaisemmissa mittauksissa saatuihin arvoihin. Taulukosta nähdään, että nyt saadut pitoisuudet ovat pääosin samaa suuruusluokkaa aiempien mittausten tulosten kanssa. TOC- ja CO-pitoisuudet ovat kuitenkin jonkin verran korkeammat kuin aikaisemmin. Raskasmetallien osalta Cd:n ja Tl:n yhteispitoisuus sekä Hg-pitoisuus ovat prosentuaalisesti kasvaneet paljon aikaisemmasta, vaikka pitoisuudet ovat edelleen pieniä ja alle raja-arvon.

Taulukko 23: SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>-, HCl-, HF-, CO- ja raskasmetallipitoisuuksien (mg/m<sup>3</sup>n) sekä TOC-pitoisuuden (mg C/m<sup>3</sup>n) vertailu aiempiin mittaustuloksiin (Räty, 2008).

	5/2008 Pesurin jälkeen	11/2005 Pesurin jälkeen	4/2005 Pesurin jälkeen	12/2004 Pesurin jälkeen	Raja- arvo
SO <sub>2</sub>	725	739	725	615	350
NO <sub>x</sub>	602	587	728	759	450 (tavoite)
HCl	< 1	0,6	0,7	2	100
HF	3	4	5,3	3	40
TOC	456	254	331	-	20
CO	1482	1143	995	1052	450
Cd ja Tl yht.	0,012	0,007	0,004	-	0,05
Hg	0,013	0,002	0,008	-	0,05
Sb, As, Co, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, V yht.	0,08	0,112	0,037	-	0,5

Dioksiini- ja furaanipitoisuudet ovat taulukon 24 mukaan hiukan nousseet aikaisemmista mittauksista, mutta ovat silti reilusti alle asetetun raja-arvon.

Taulukko 24: Dioksiini- ja furaanipitoisuuksien (PCDD/F, I-TEQ ng/m<sup>3</sup>n) vertailu aiempiin mittaustuloksiin (Räty, 2008).

	5/2008 Pesurin jälkeen	11/2005 Pesurin jälkeen	4/2005 Pesurin jälkeen	12/2004 Pesurin jälkeen
PDDD/F	0,032	0,021	0,025	-

Hienokuonan lisääminen ei siis ole merkittävästi lisännyt haitta-aineiden pitoisuuksia savukaasuissa, mutta toisaalta se ei ole myöskään vähentänyt niitä.

## 11. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää soveltuuko hienokuona kevytsoran raaka-aineen lisäaineeksi. Hienokuonaa syntyy Boliden Harjavalta Oy:n kuparin valmistuksen poisteena noin 350 000 tonnia vuodessa. Kuonalla ei tällä hetkellä ole hyötykäyttökohteita, vaan se kaikki varastoidaan suurille läjitysalueille. Uudet läjitysalueet rakennetaan yhä kauemmaksi sulatosta, jolloin lietteenä läjitysalueelle pumpattavan jätteen siirtomatka pitenee. Uusien läjitysalueiden etsintä ja vaadittujen pohjarakenteiden rakentaminen vie aikaa ja rahaa, varsinkin kun tehdasta lähellä olevat parhaat läjitysalueet on jo käytetty.

Hyötykäyttökohteen löytäminen hienokuonalle siirtäisi uuden läjitysalueen tarvetta pidemmälle tulevaisuuteen tai parhaassa tapauksessa jopa poistaisi uusien läjitysalueiden tarpeen, riippuen siitä kuinka paljon kuonaa saataisiin hyötykäyttöön vuodessa. Jotta hienokuonan hyödyntäminen olisi Boliden Harjavalta Oy:lle taloudellisesti kannattavaa, pitäisi hienokuonan hyödyntämisen maksaa vähemmän kuin sen läjittäminen. Paras tilanne olisi tietenkin se, että joku maksaisi hienokuonasta Bolidenille. Taloudellisen hyödyn lisäksi hienokuonan hyödyntäminen olisi positiivinen asia myös yrityksen imagon kannalta.

Boliden Harjavalta Oy yhdessä Outotec Research Oy:n kanssa on etsinyt ja tutkinut erilaisia hienokuonan hyötykäyttökohteita KUNI-projektissa. Tämä diplomityö tehtiin osana kyseistä projektia. Tässä diplomityössä keskityttiin tutkimaan sitä, soveltuuko hienokuona kevytsoran lisäaineeksi.

Suomessa kevytsoraa valmistaa ainoastaan maxit Oy Ab. Kevytsoran tuotantoprosessissa pääraaka-aineena toimivan saven sekaan lisätään raskasta polttoöljyä, ns. saviöljyä, parantamaan saven paisumisominaisuuksia. Savirakeita paisuttavat kaasut tarvitsevat muodostuakseen riittävästi rautaa ja orgaanista hiiltä. Jos näitä aineita ei ole riittävästi luonnonsavessa, tuodaan niitä prosessiin saviöljyn avulla.

Vuonna 2002 maxit Oy Ab:n Kuusankosken kevytsoratehtaalla suoritettiin tehdaskoeajo, jossa kevytsoran tuotantoprosessiin lisättiin raaka-aineen sekaan ferrosilikaattia ja saviöljyn määrää vähennettiin noin 20 %. Vuonna 2003 maxit Oy Ab teki

paisutuskokeita, joissa saveen lisättiin 100 % Fe-pulveria. (Raita, 2003) Molemmissa kokeiluissa tulokset olivat erittäin positiivisia. Näiden kokemusten perusteella lähinnä ferrosilikaatista ja rautaoksidaista muodostuvalta hienokuonalta odotettiin paljon ja maxit Oy Ab lähti mukaan tutkimusprojektiin.

maxit Oy Ab:n kannalta hienokuonan lisääminen kevytsoran raaka-aineseokseen on kannattavaa, jos lisäyksellä saadaan taloudellisia hyötyä, lopputuotteen laatu paranee tai jos lisäyksellä saadaan ympäristökuormitusta pienennettyä. Taloudellinen hyöty syntyy lähinnä siitä, jos hienokuonalla pystyttäisiin korvaamaan joko osa tai kaikki nyt prosessissa tarvittavasta saviöljystä. Ympäristökuormitus taas pienenee, jos hienokuonalla todettaisiin olevan savukaasujen päästöjä pienentävä vaikutus.

Tässä diplomityössä tutkittiin hienokuonan vaikutusta kevytsoran materiaali- ja rakenneominaisuuksiin sekä liukoisuuksiin. Hienokuonan lisäyksen ohella tutkittiin myös saviöljyn määrän vähentämisen vaikutuksia lopputuotteen ominaisuuksiin. Tutkimuksia varten Kuusankosken kevytsoratehtaalla suoritettiin tehdaskoeajoja, joissa hienokuonaa lisättiin raaka-aineseokseen eri osuuksia ja osassa ajoista saviöljyn osuutta laskettiin noin puoleen normaalista määrästä. Näistä koeajoista kerättiin yhteensä 6 hienokuonaa sisältävää näytettä sekä 0-näyte. Näytteissä oli joko 3 %, 5 % tai 8 % hienokuonaa raaka-ainesyötteen märkäpainosta ja jokaisella hienokuonaosuudella tuotettiin näytettä, jossa oli normaali määrä saviöljyä sekä näytettä, jossa oli noin puolet saviöljyn normaalista määrästä.

Tehdaskoeajojen alkuvaiheessa näytti siltä, että hienokuonan lisääminen raaka-aineseokseen tasapainotti koko tuotantoprosessia. Koeajojen jatkuessa tasapainottava vaikutus kuitenkin hävisi ja lopulliset kommentit prosessia seuranneilta työntekijöiltä, oli, että hienokuona ei parantanut eikä heikentänyt prosessin kulkua.

Laboratoriossa tehtyjen mineralogisten ja rakennetestien perusteella voidaan hienokuonan vaikutuksista kevytsoraan todeta lähes sama kuin tehdaskoeajoissa. Hienokuona ei vaikuta mainittavasti parantavan kevytsoran ominaisuuksia, mutta ei oikeastaan heikentävänkään niitä.

Hienokuonan lisääminen raaka-aineseokseen nosti irtokuivatihyettä jonkin verran, mutta vasta sitten kun saviöljyn määrää vähennettiin. Pelkkä hienokuonan lisäys ei aiheuttanut tiheyden kasvua juuri lainkaan.

Hienokuona lisäsi kevytsoran huokoisuutta muutaman prosenttiyksikön verran kun hienokuonan osuus raaka-aineseoksesta oli 3 % tai 5 %. Hienokuonan osuuden noustessa 8 %:in huokoisuus laski 0-näytteen tasolle. Saviöljyn määrän vähentäminen laski huokoisuutta runsaasti 5 % ja 8 % hienokuonaosuuksilla.

Kevytsoran puristusmurtolujuuteen hienokuonalla oli positiivinen vaikutus. Murskautuvuustestissä saadut puristusmurtolujuudet olivat kaikki reilusti yli vaaditun tason ja yksittäisten rakeiden puristustestissä kaikki hienokuonaa sisältävien rakeiden lujuudet olivat suurempia kuin 0-näytteellä. Kevytsoran lujuuksissa ei kuitenkaan havaittu olevan merkitystä sillä, kuinka paljon hienokuonaa lisättiin. Puristusmurtolujuus oli lähes sama kaikilla hienokuonaa sisältävillä näytteillä. Yksittäisen rakeen puristusmurtolujuuksien kohdalla saviöljyn määrän vähentäminen aiheutti lujuuksien kasvua. Kevytsorapatsaan murskautuvuuskokeessa ei vastaavaa vaikutusta huomattu. 0-näytettä suuremmat puristusmurtolujuudet voivat selittyä optisen mikroskoopin kuvissa havaitulla ilmiöllä. Kuvissa hienokuonaa sisältävän rakeen ulko-osalla on huomattavasti pienempiä huokosia kuin 0-näytteen ulko-osalla. Hienokuonaa sisältävien näytteiden suuremmat lujuusarvot voivat osittain johtua rakeiden ulko-osan tiheimmästä rakenteesta. Näytteiden huokoisuutta tutkittaessa saviöljyn määrän vähentäminen laski kevytsorarakkeiden huokoisuutta. Todennäköisesti tästä syystä saviöljyn määrän vähentäminen nostaa puristusmurtolujuuksia.

Hienokuonan lujuutta parantavasta vaikutuksesta huolimatta hienokuona lisäsi kevytsoran hiertymistä. Hiertyminen kuvaa tietyllä tapaa sitä, kuinka hyvin materiaali kestää kuljetusta. Hiertymistä testataan Tumbler-rummulla, jossa kevytsorarakkeita pyöritettiin ja rakeet hiertyivät toisiaan ja rummun seiniä vasten. Hienokuonaa sisältävistä näytteistä hiertyi enemmän materiaalia kuin 0-näytteestä. Näytteestä, jossa oli 3 % hienokuonaa, hiertyi kuitenkin enemmän materiaalia kuin näytteestä, jossa oli 8 % hienokuonaa. Suuret hienokuonamäärät saattaisivat siis pienentää hiertymistä, vaikka pienet määrät lisäävät sitä. Saviöljymäärän vähentäminen lisäsi hiertymistä edelleen.

Kevytsoran veden kapillaariseen nousukorkeuteen tai lämmönjohtavuuteen hienokuonalla ei näiden testien perusteella näytä olevan vaikutusta.

Materiaaliominaisuuksien kannalta hienokuonalla ei tehtyjen tutkimusten perusteella ole mainittavia haittavaikutuksia, mutta ei myöskään merkittäviä positiivisia vaikutuksia. Materiaaliominaisuudet eivät siis ole esteenä hienokuonan käytölle kevytsoran valmistuksessa, mutta eivät myöskään kannusta ottamaan hienokuonaa yhdeksi raaka-aineeksi.

Ympäristön kannalta kevytsoran tulee täyttää pysyvän jätteen kaatopaikalle asetetut liukoisuusrajat. Raja-arvot on annettu läpivirtaustestin tuloksille L/S-suhteessa 10. Koska läpivirtaustesti on hidas tehdä ja tutkittavia näytteitä oli useita, tutkittiin liukoisuutta pääosin kaksivaiheisella ravistelutestillä. Vertailun vuoksi läpivirtaustesti suoritettiin yhdelle näytteelle. Kun tämän näytteen läpivirtaustestin tuloksia verrattiin lähes vastaavan näytteen kaksivaiheisen ravistelutestin tuloksiin, voitiin todeta, että tulokset olivat hyvin samansuuruisia ja, että kaatopaikkaluokituksen raja-arvoja voidaan soveltaa myös kaksivaiheisen ravistelutestin tuloksille.

Kaksivaiheisen ravistelutestin tuloksista nähtiin, että arseenin ja molybdeenin liukoisuudet ylittävät pysyvän jätteen kaatopaikalle asetetut raja-arvot kaikilla hienokuonaa sisältävillä näytteillä. Myös läpivirtaustestissä arseenin ja molybdeenin raja-arvot ylittyivät. Tämä tulos yksin riittää siihen, että hienokuonaa ei voida käyttää kevytsoran lisäaineena, ainakaan sellaisenaan.

Kaksivaiheisessa ravistelutestissä arseenin liukoisuus 5 % ja 8 % hienokuonakuonaa sisältävillä näytteillä oli itse asiassa suurempi kuin puhtaalla hienokuonalla. Puhtaassa hienokuonassa arseeni esiintyy erilaisina oksideina, jotka liukenevat eri pH-arvoissa. Puhtaasta hienokuonasta on todettu arseenia liukenevan eniten happamissa ja emäksisissä olosuhteissa, vähiten neutraaleissa olosuhteissa. pH-staattisessa liukoisuustestissä arseenia liukeni kuitenkin vähemmän happamissa olosuhteissa kuin näytteen luonnollisessa pH-arvossa 10. pH-staattisen testin perusteella on mahdollista, että happamissa olosuhteissa liukenevat arseeniyhdisteet ovat sitoutuneet kevytsoraan paremmin kuin emäksisissä olosuhteissa liukenevat. Jos kevytsoran luonnollista pH-arvoa saataisiin laskettua lähemmäksi neutraalia aluetta, arseenin liukoisuus voisi



mahdollisesti pienentyä. Nyt tehdyssä pH-staattisessa testissä analysointitarkkuudet ovat kuitenkin riittämättömiä, jotta voitaisiin tulkita liukeneeko arseenia pienemmissä pH-arvoissa silti yli sallitun raja-arvon.

Yhteenvedona voidaan sanoa, että hienokuona ei haittaa eikä paranna kevytsoran tuotantoprosessia. Rakenneominaisuuksiin saatiin pientä parannusta hienokuonan nostaessa puristusmurtolujuuksia. Hienokuonalla ei kuitenkaan voida korvata saviöljyä, sillä saviöljyn määrän vähentäminen nosti irtokuivatiheyksiä ja näytteiden hiertymistä sekä laski rakeiden huokoisuutta. Saven korvaajana hienokuonalla on pieni merkitys, sillä raaka-aineseokseen lisäävät osuudet eivät ehkä prosentuaalisesti voi olla kovin suuria. Hienokuonalla ei myöskään havaittu vaikutuksia savukaasujen päästöihin. Ja tärkeimpänä tuloksena kaikista, hienokuonan lisäys nostaa arseenin ja molybdeenin liukoisuusarvot yli sallitun, mikä estää hienokuonan käytön kevytsoran lisäaineena.

maxit Oy Ab:lle hienokuonan käytöstä ei siis koidu taloudellista hyötyä saviöljyn tarpeen vähenemisenä, sen lopputuotteen laatu ei merkittävästi parane eikä hienokuonan käyttö vähennä tehtaan ympäristökuormitusta. Hienokuonaa voitaisiin käyttää kevytsoran lisäaineena, jos joko hienokuonaa tai maxit Oy Ab:n tuotantoprosessia onnistuttaisiin muokkaamaan niin, että hienokuonan ympäristölle haitalliset aineet saataisiin sidottua kevytsorarakkeisiin liukenemattomaan muotoon. Tämä tietenkin edellyttää sitä, että hienokuonan hyödyntäminen on edullisempaa kuin kuonan läjittäminen tarvittavien muutostenkin jälkeen. Kuonan hyödyntäminen olisi toki molemmille yrityksille imagollisesti hyvä asia. Jos hienokuona saadaan sitoutumaa kevytsorarakkeisiin eri tavalla kuin nyt tutkituissa näytteissä, on tietenkin myös mahdollista, että materiaali-ominaisuudet muuttuvat myös kevytsoratuotteen kannalta positiivisemmiksi. Tämä vaatii kuitenkin asian tarkastelemista enemmän kemialliselta ja tuotantotekniseltä näkökulmalta kuin geotekniseltä näkökulmalta.

## Lähdeluettelo

Biswas A.K., Davenport W.G. 1994. Extractive metallurgy of copper. Third edition. British Library Cataloguing in Publication Data. 500 p. ISBN 0-08-042124-5.

Boliden Oy. 2008. <http://www.boliden.se>. [viitattu 9.1.2008].

Eerola, Heikki. 2008. Puhelinkeskustelut ja sähköpostiviestit koskien Outotec Research Oy:n tutkimuskeskuksessa tehtyjä kokeita kevytsoranäytteillä.

European Commission. 2007. Reference document on best available techniques in the ceramic manufacturing industry. August 2007.

<http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/pages/FActivities.htm>

Eurooppalainen Standardi, SFS-EN 1097-10. 2002. Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 10: Determination of water suction height. 11 s. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Eurooppalainen Standardi, SFS-EN 13055-1. 2002. Kevyt kivimateriaalit. Osa 1: Betonin, laastin ja juotoslaastin kevyt kivimateriaalit. 37 s. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

European Standard EN 12457-3. 2002. Characterization of waste - Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 3: Two stage batch test at a liquid to solid ratio of 2 l/kg and 8 l/kg for materials with high solid content and with particle size below 4 mm (without or with size reduction). 30 p.

European Standard, final draft, prCEN/TS 14997. 2006. Characterization of waste - Leaching behaviour tests Influence of pH on leaching with continuous pH-control. 30 p.

Fagerlund, K., Sotka P., Liipo J., Gasik M., Ruokonen E. 2004. Evaluation of arsenic dissolution behaviour of iron silica sands. REWAS 2004: Global symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology (26.-29. September 2004, Madrid,

Spain). Outokumpu Rossija Oy, Helsinki University of Technology, Boliden Harjavalta Oy. 9 p.

Junnikkala, Saku. 2008. Palaveri Boliden Harjavalta Oy:llä Harjavallassa 19.2.2008.

Kaakkois-Suomen Ympäristökeskus. 2000. Ympäristölupapäätös, A 1096, 0400Y0206-111. 29.12.2000. Optiroc Oy Ab, Kuusankoski. Kevytsoratehdas. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=8353&lan=fi>.

Kaakkois-Suomen Ympäristökeskus. 2004. Ympäristölupapäätös, A 1092, KAS-2004-Y-11-111. 2.7.2004. Optiroc Oy Ab, Kuusankoski. Kevytsoratehdas. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=20100>.

Kiviö, Miia. 2006. Kuparinsulatuskuonien hyötykäyttö. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, materiaalitekniikan osasto. Espoo. 87 + 37 s.

Kytö, M., Vartiainen, A. 1993a. Kuonat kuparin ja nikkelin liekkisulatuksessa. AEL-INSKO, Kuonametallurgia, luku 8. 83 s.

Kytö, M., Vartiainen, A. 1993b. Kuonat kuparin konvertoinnissa ja raffinoinnissa. AEL-INSKO, Kuonametallurgia, luku 8. 69 s.

Kärkkäinen, Mika. 1990. Kevytsora maanpaineen kuormittamien seinä- ja tukirakenteiden taustatäyttönä. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittausosasto. Espoo. 75 s. (85 s.)

Lounais-Suomen Ympäristökeskus. Ympäristölupapäätös, Nro 39, Dnro 0200Y0031-111. 30.5.2002. Outokumpu Harjavalta Metals Oy, Harjavalta. Rikastushiekan ns. Lammaisten läjitysalueen korottaminen ja laajentaminen. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=3443&lan=fi>

maxit Group. 2008. <http://www.maxit-group.com>. [viitattu 25.3.2008]

maxit Oy Ab. 2008. <http://www.maxit.fi>. [viitattu 25.3.2008]

Miikkulainen, Ilpo. 2008. Palaveri Boliden Harjavalta Oy:llä Harjavallassa 19.2.2008.

Mukkula, Jari. 2008a. Palaveri maxit Oy Ab:llä Helsingissä 29.1.2008.

Mukkula, Jari. 2008b. Palaveri Boliden Harjavalta Oy:llä Harjavallassa 19.2.2008.

Mukkula, Jari. 2008c. Palaveri maxit Oy Ab:llä Helsingissä 10.6.2008.

Nab Labs Oy. 2008. maxit Oy Ab, LECA-soratehdas, Ilmanpäästömittaukset 21.–22.5. 2008. Raportti nro 08R051. 5 s. + liitteet.

Ohlström M., Savolainen I, VTT Prosessit. Teknologiaa kasvihuonepäästöjen vähentämiseen, taustatyö kansallisen ilmastostrategian päivitystä varten. KTM Julkaisu 1/2005, Energiaosasto. 182 s.

Pöysti, Mikko. 2008. Lämmönjohtavuuskokeiden raportit ja sähköpostiviestit liittyen maxit Oy Ab:n tekemiin lämmönjohtavuuskokeisiin.

Raita, Mikael. 2008. Tehdaskierros Kuusankosken Leca-soratehtaalla. 8.5.2008.

Raita, Mikael. 2003. Kymi Paper Oy:n ja UPM Kymmene Oyj:n Voikkaan paperitehtaan sivutuotevirrat ja niiden hyödyntäminen. Opinnäytetyö. Etelä-Karjalan ammatti-  
korkeakoulu, Prosessitekniikan koulutusohjelma. 47 s. (+ liitteet 10 kpl)

Rakennustieto Oy. RT K-36951, RT/KH 373-36951, Leca-Sora. Huhtikuu 2005. 4s.  
<http://80.248.160.64/products/ProductServlet?action=documentinfo&documentid=3059>  
210

Rantamäki M., Jääskeläinen R., Tammirinne M.. 1999. Geotekniikka, 464. 17. muuttumaton painos. Oy Yliopistokustannus/Otatieto. 307 s. ISBN 951-672-257-1.

Räty, Satu. 2008. maxit Oy Ab Kuusankosken LECA-soratehtaan kuparikuonakoe-  
ajojen aikaiset ilmanpäästömittaukset 21.–22.5.2008. Raportti. 3 s.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2004. Technical Specification CEN/TS 14405:2004: Characterization of waste. Leaching behaviour tests. Up-flow percolation test (under specified conditions). 25 p.

Taskinen, Pekka. 2008. Laboratoriokierros Outotec Reasearch Oy:n tutkimuskeskuksessa Porissa 21.5.2008.

Oy Teboil Ab. 2008.

<http://www.teboil.fi/Product.asp?path=1;1510;1508;4349;4590> [viitattu 29.2.2008]

Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2006. Wahlström M., Laine-Ylijoki J., Vestola E., Vaajasaari K., Joutti A. Jätteiden kaatopaikkakelpoisuuden toteaminen. 82 s.

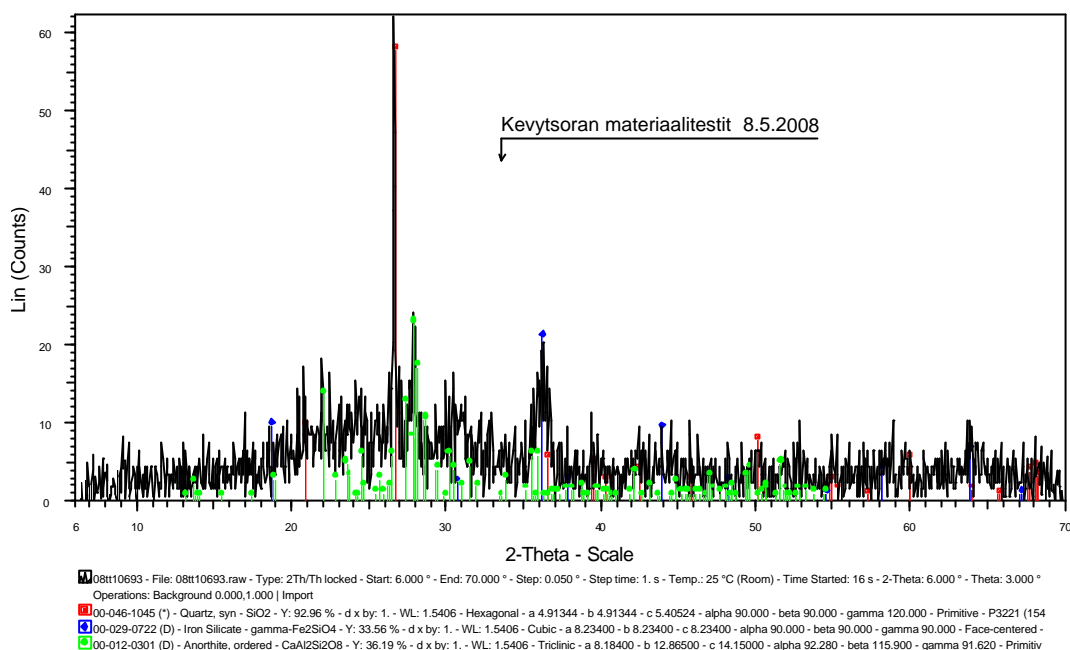
Wiklund, Anders. 2007. Optimization of recycled oil use for LWA production. Diploma work. Åbo Akademi University, Faculty of Technology, Laboratory of Heat engineering. 137 s.

# Liitteet

## Röntgendiffraktometrin raportit

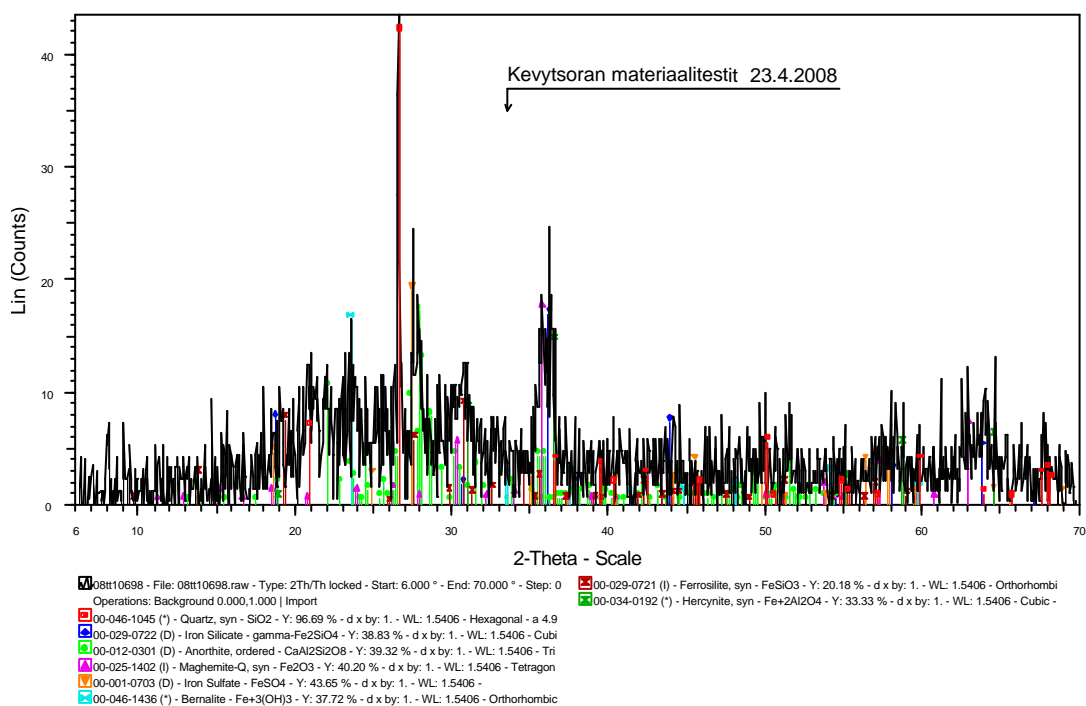
LIITE 1 (1/3)

### Laboratorioraportti



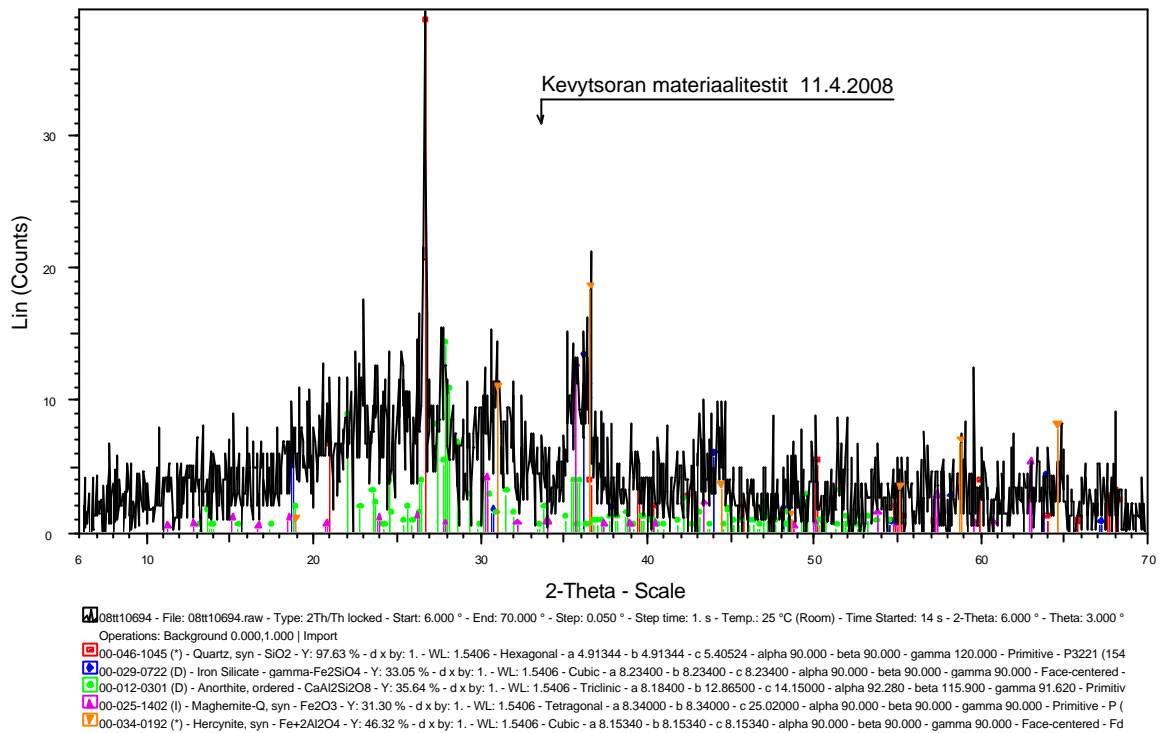
Kuva 1: 0-näytteen (0 %/0,7%) sisältämät aineet ja yhdisteet.

### Laboratorioraportti



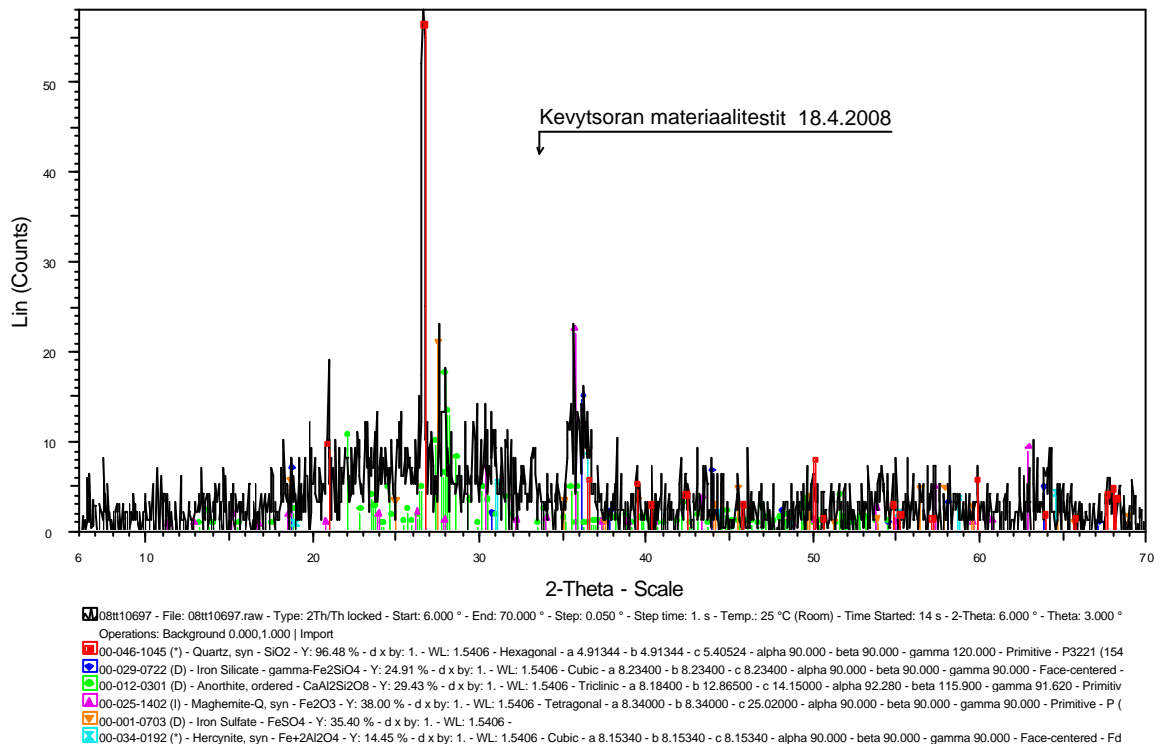
Kuva 2: Näyte 2:n (3%/0,5%) sisältämät aineet ja yhdisteet.

## Laboratorioraportti



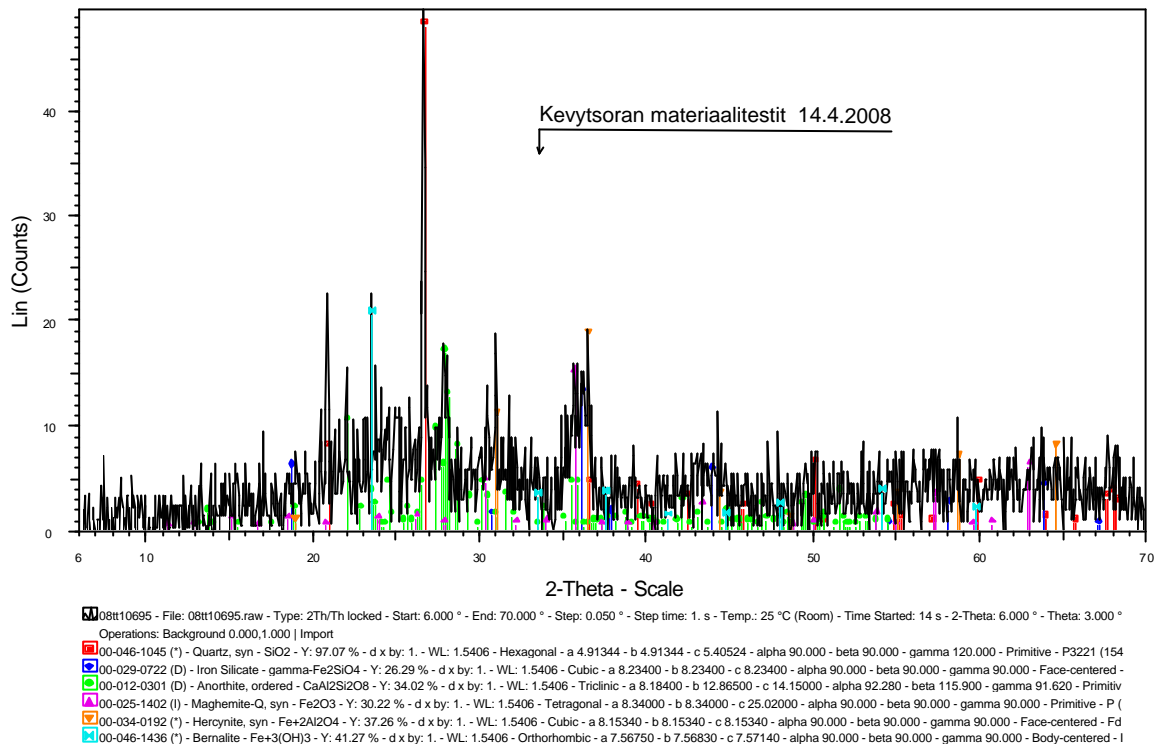
Kuva 3: Näyte 3:n (5%/0,6%) sisältämät aineet ja yhdisteet.

## Laboratorioraportti



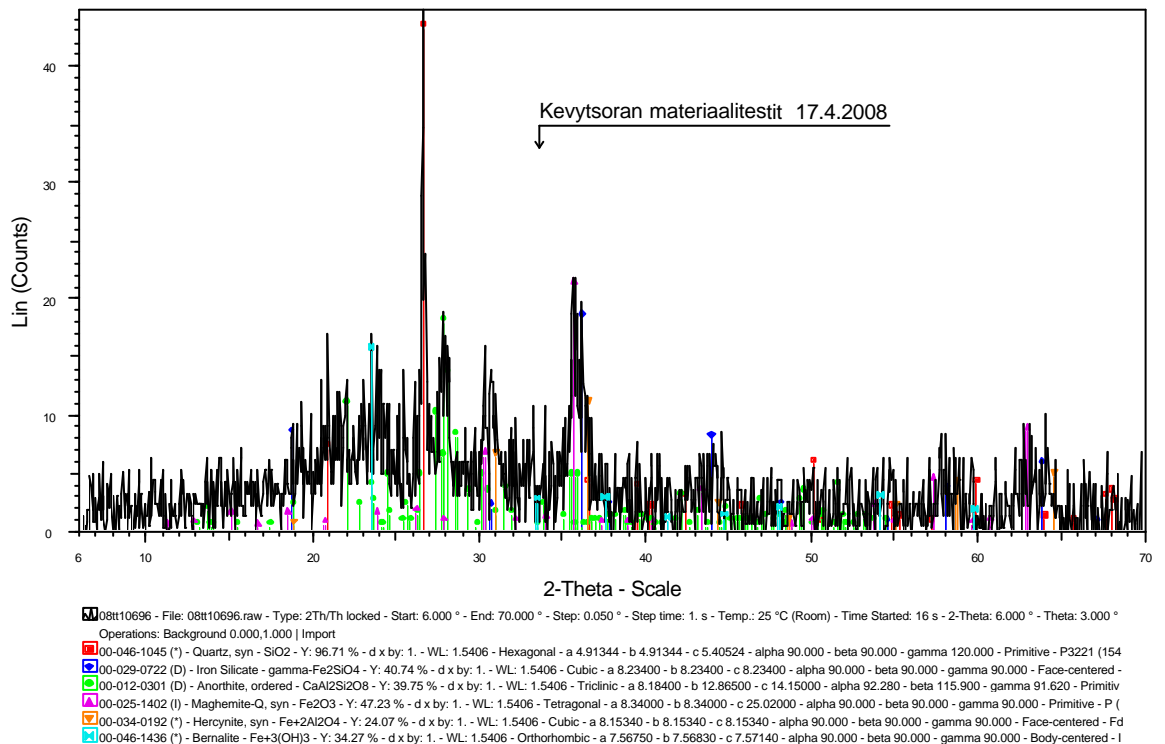
Kuva 4: Näyte 4:n (5%/0,3%) sisältämät aineet ja yhdisteet .

## Laboratorioraportti



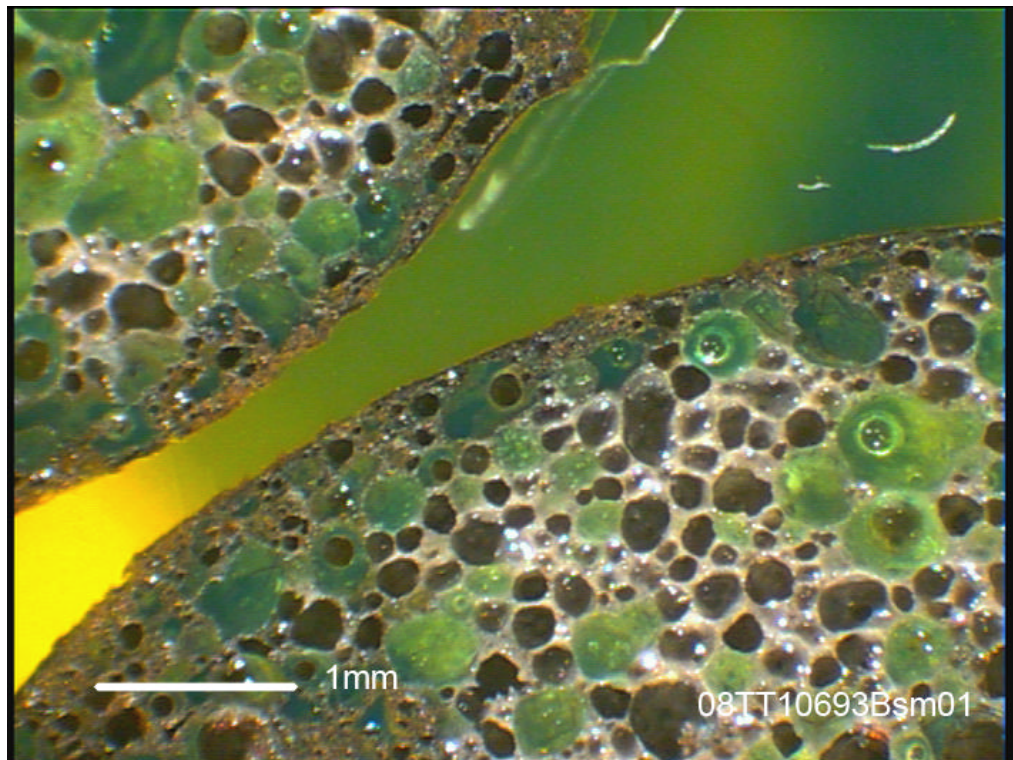
Kuva 5: Näyte 5:n (8%/0,7%) sisältämät aineet ja yhdisteet.

## Laboratorioraportti

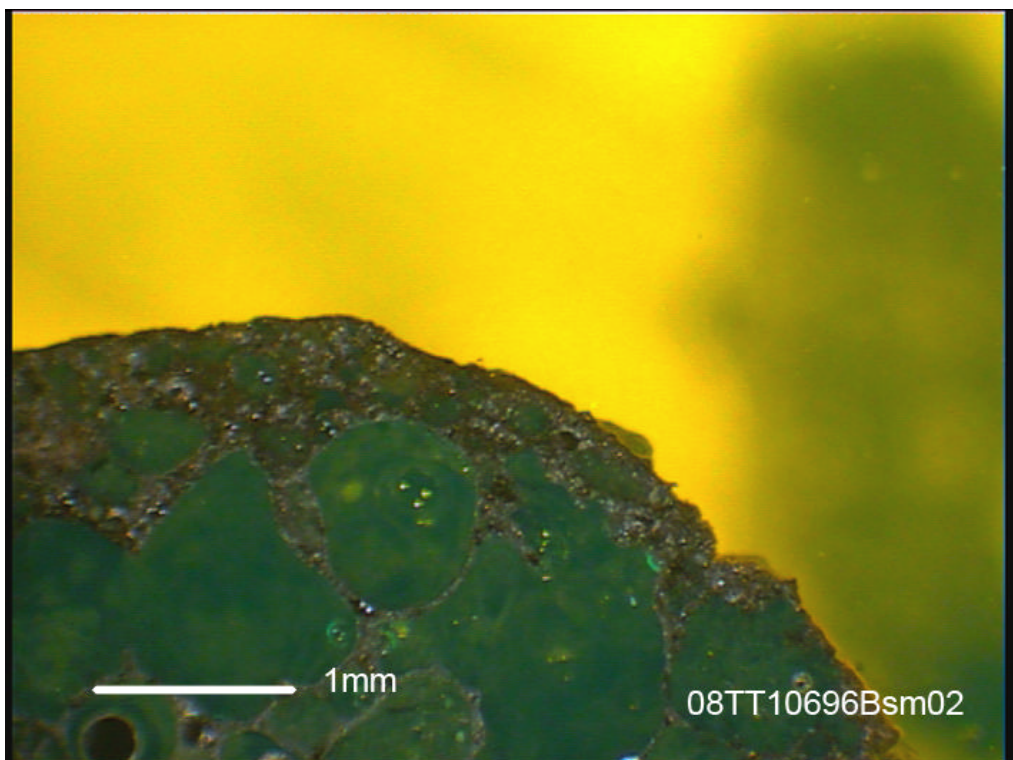


Kuva 6: Näyte 6:n (8%/0,3%) sisältämät aineet ja yhdisteet.

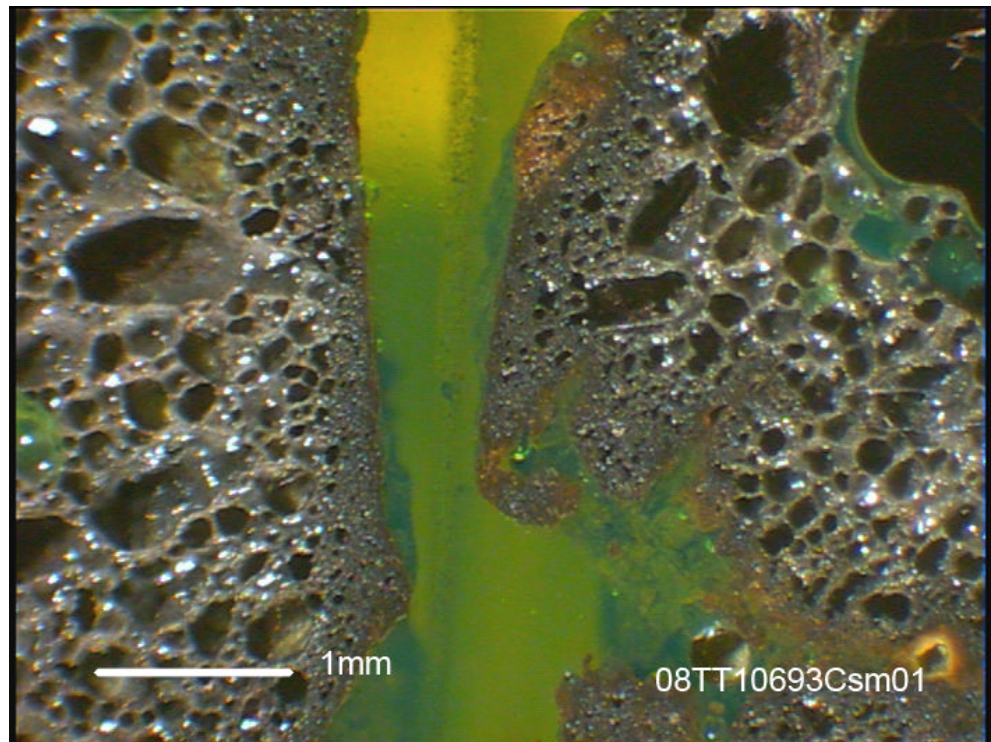




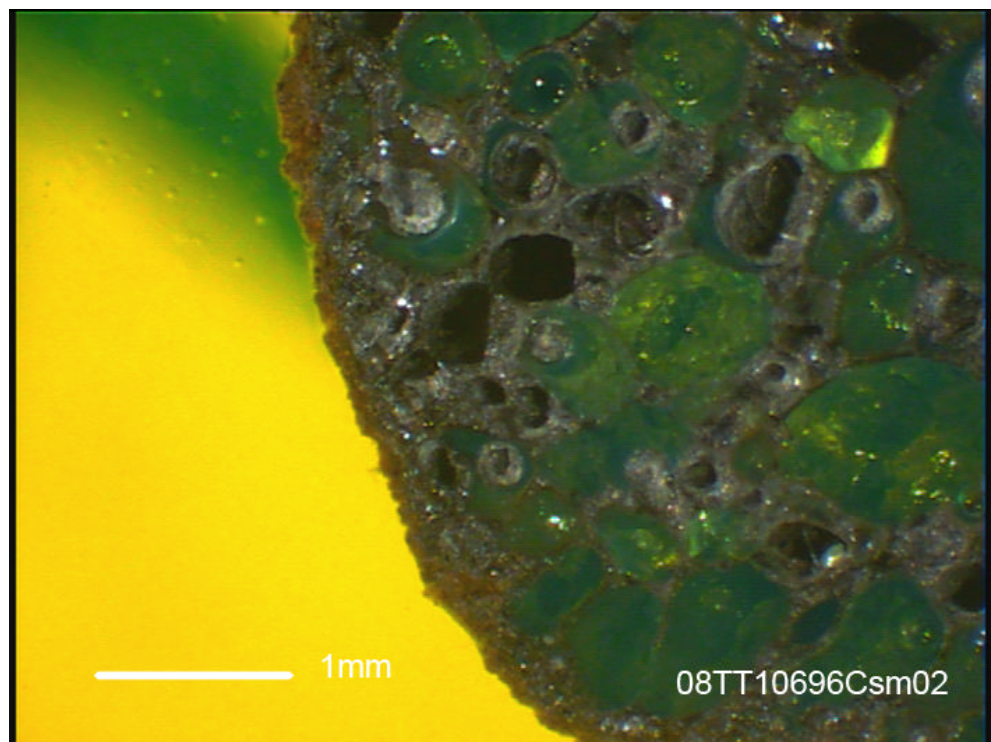
Kuva 1: Optisen mikroskoopin kuva 0-näytteestä.



Kuva 2: Optisen mikroskoopin kuva näytteestä 6.

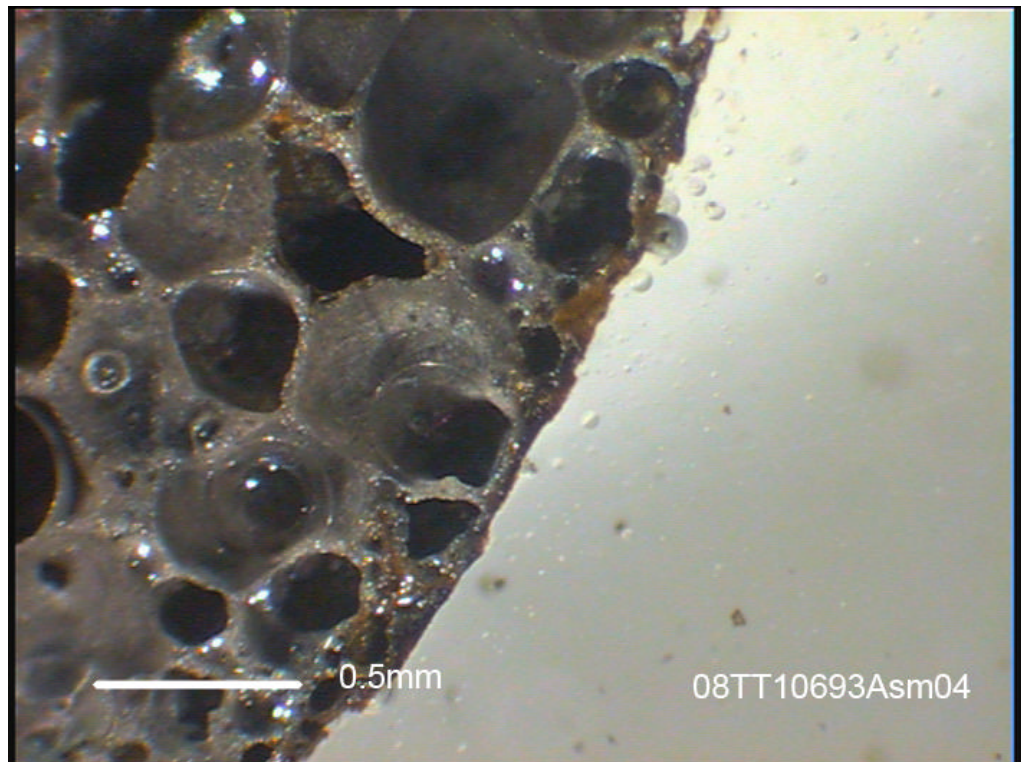


Kuva 3: Optisen mikroskoopin kuva 0-näytteestä.

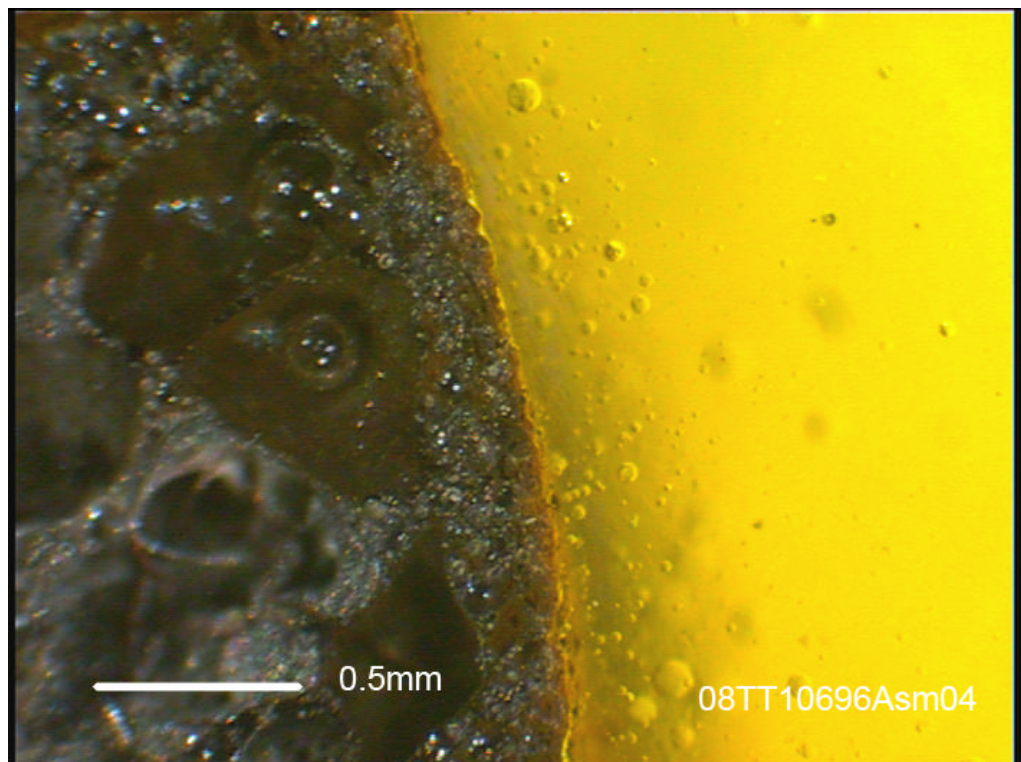


Kuva 4: Optisen mikroskoopin kuva näytteestä 6.

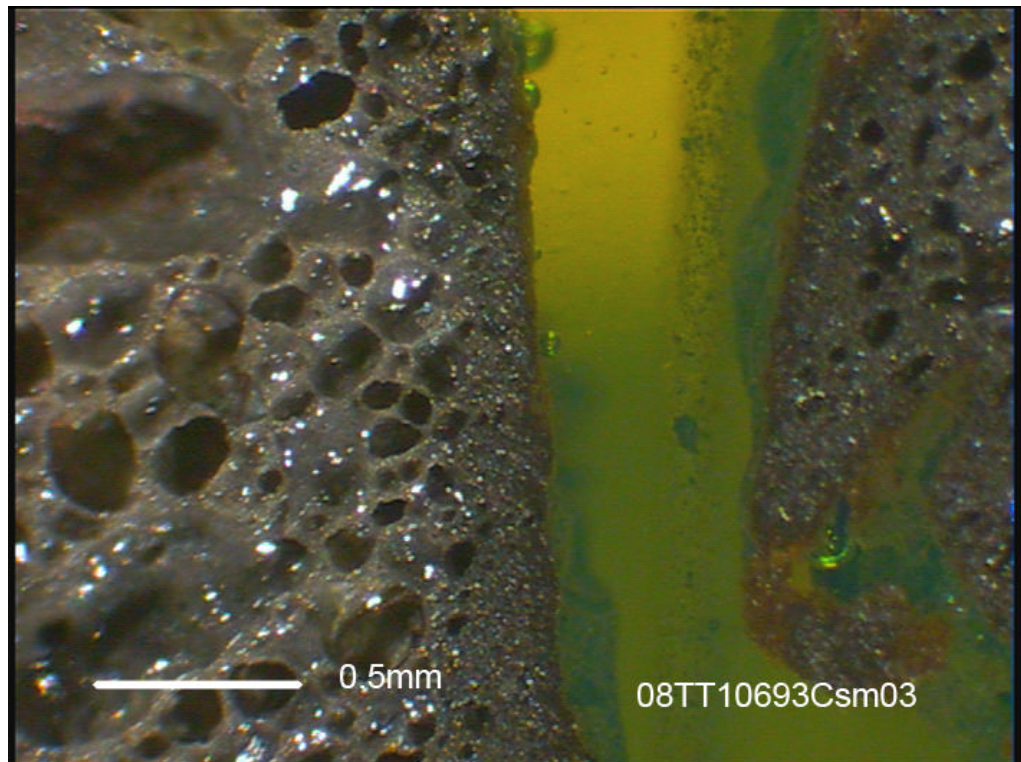




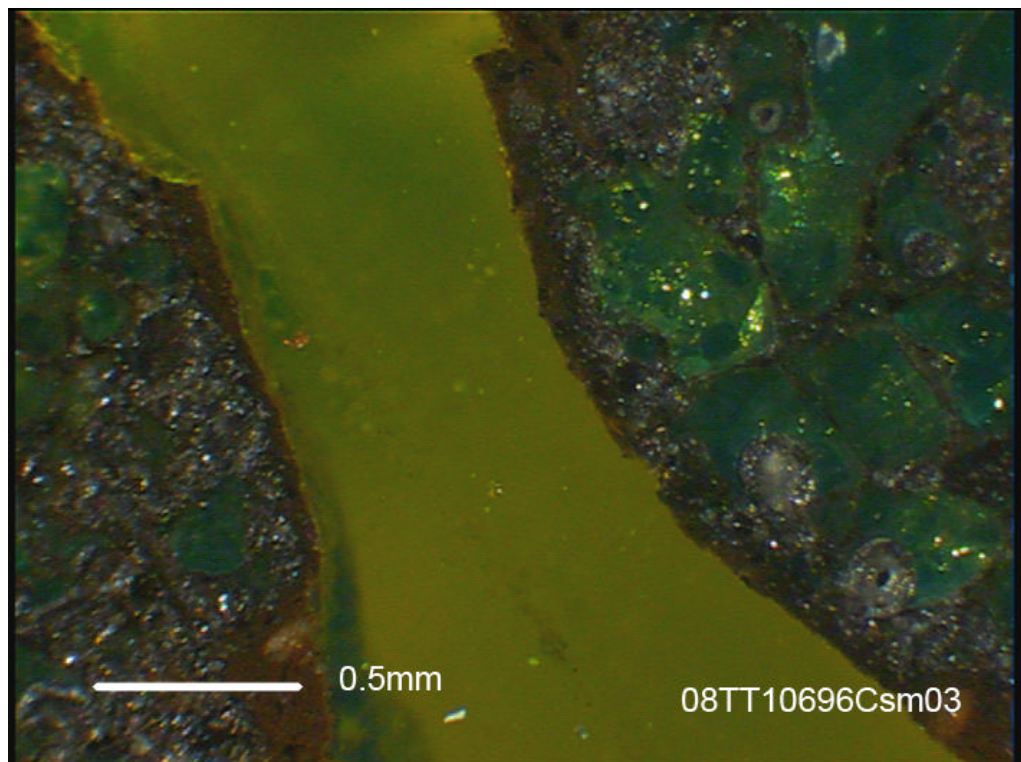
Kuva 5: Optisen mikroskoopin kuva 0-näytteestä.



Kuva 6: Optisen mikroskoopin kuva näytteestä 6.

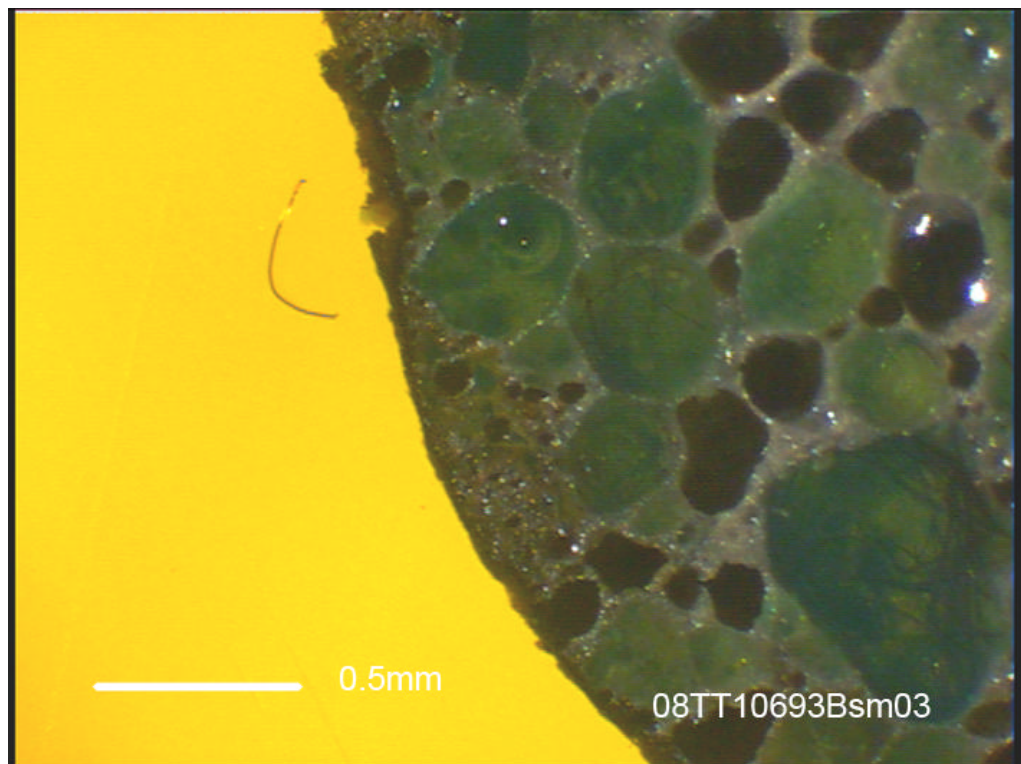


Kuva 7: Optisen mikroskoopin kuva 0-näytteestä.

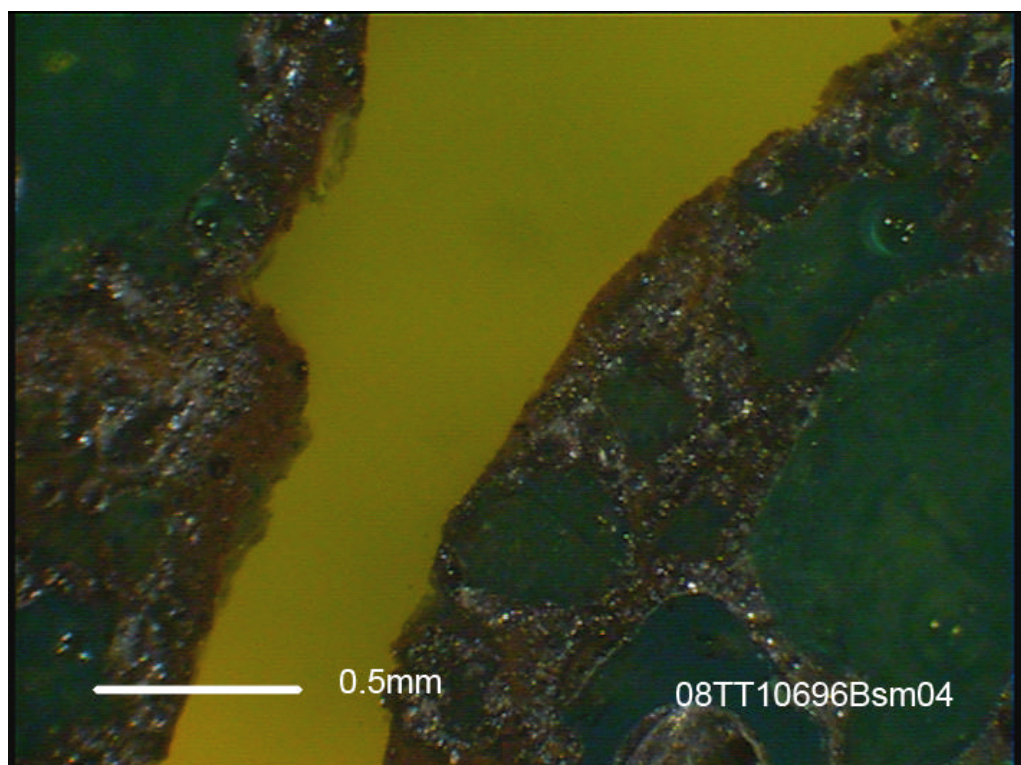


Kuva 8: Optisen mikroskoopin kuva näytteestä 6.

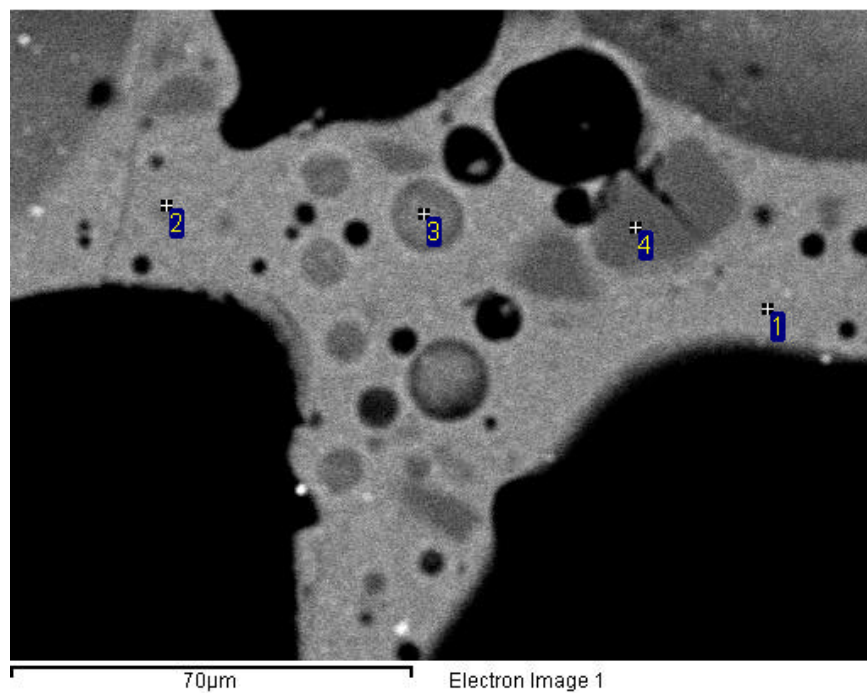




Kuva 9: Optisen mikroskoopin kuva 0-näytteestä.



Kuva 10: Optisen mikroskoopin kuva näytteestä 6.



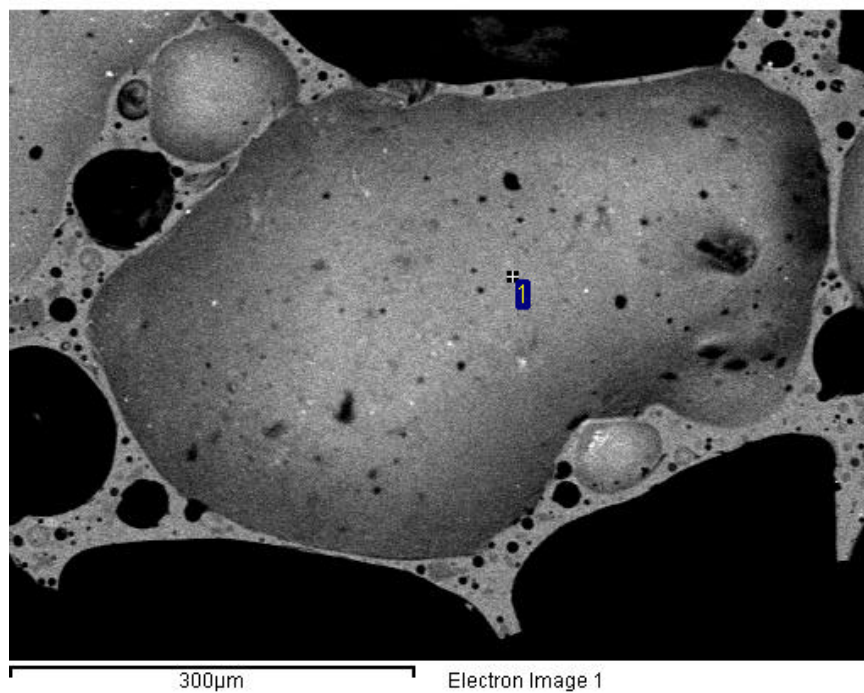
Kuva 1: 0-näyte.

Taulukko 1: Kuvassa 1 osoitettujen pisteiden alkuainekoostumus.

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Total	
1	Yes	41.61938	1.709591	2.623216	10.66223	31.03335	4.102149		8.250083	100	Lasi
2	Yes	43.5116	1.858682	2.076813	8.758795	31.36403	4.227498	1.599427	6.603148	99.99999	Lasi
3	Yes	43.24523		2.962026	9.494958	27.09087	4.265975	1.973563	10.96737	100	Lasi
4	Yes	50.06023				49.93978				100	Kvartsi
Max.		50.06023	1.858682	2.962026	10.66223	49.93978	4.265975	1.973563	10.96737		
Min.		41.61938	1.709591	2.076813	8.758795	27.09087	4.102149	1.599427	6.603148		

All results in weight%



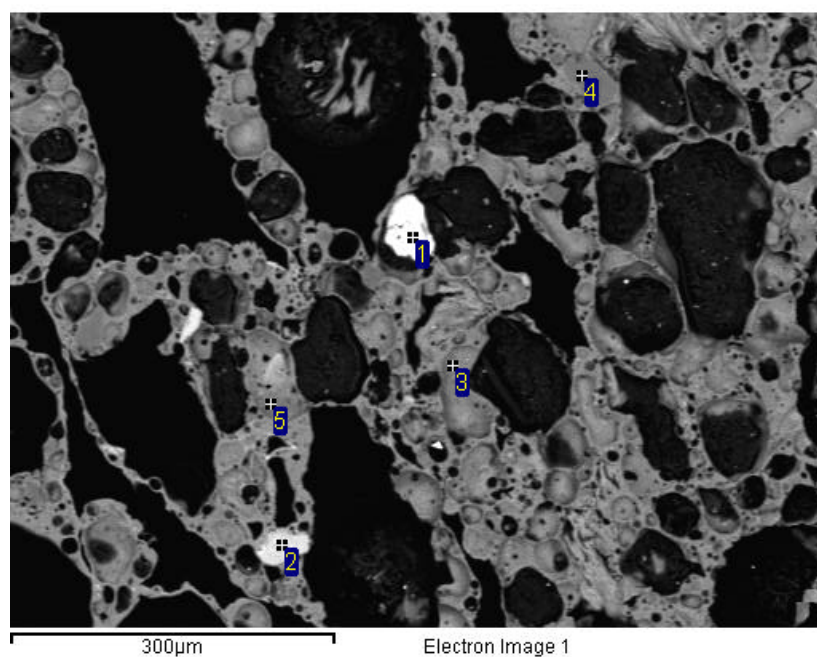
Kuva 2: 0-näyte.

Taulukko 2: Kuvassa 2 osoitettujen pisteiden alkuainekoostumus.

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Total	
1	Yes	45.20142	2.035671	2.401139	12.04858	25.23072	3.194636	1.742202	8.145636	100	Lasi
Mean		45.20142	2.035671	2.401139	12.04858	25.23072	3.194636	1.742202	8.145636	100.00	
Std. deviation		0	0	0	0	0	0	0	0		
Max.		45.20142	2.035671	2.401139	12.04858	25.23072	3.194636	1.742202	8.145636		
Min.		45.20142	2.035671	2.401139	12.04858	25.23072	3.194636	1.742202	8.145636		

All results in weight%



Kuva 3: Näyte 2 (3 % / 0,5 %).

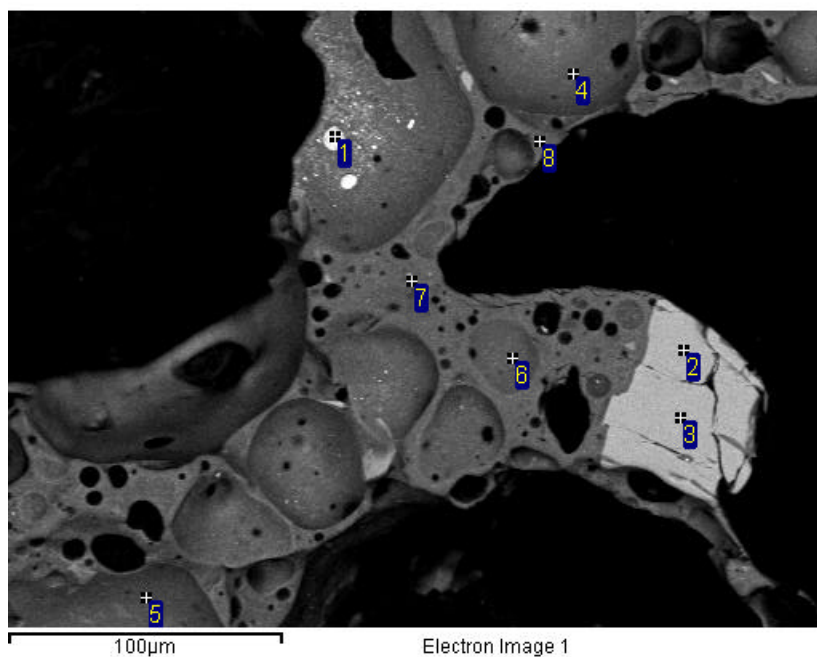
Taulukko 3: Kuvassa 3 osoitettujen pisteiden alkuainekoostumus.

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Total	
1	Yes	4.20				0.75	46.51				48.53		100.00	FeS (pyriitti)
2	Yes	33.01		0.94		19.34					44.71	2.01	100.00	Fayalite
3	Yes	16.72			6.24	16.30		8.51	4.16		48.06		100.00	Lasi
4	Yes	45.23	6.03		12.50	31.86		0.54	3.84				100.00	SiO
5	Yes	48.69	1.80	2.44	9.29	26.14		3.34	1.20	0.70	6.39		100.00	Lasi
Max.		48.69	6.03	2.44	12.50	31.86	46.51	8.51	4.16	0.70	48.53	2.01		
Min.		4.20	1.80	0.94	6.24	0.75	46.51	0.54	1.20	0.70	6.39	2.01		

All results in weight%





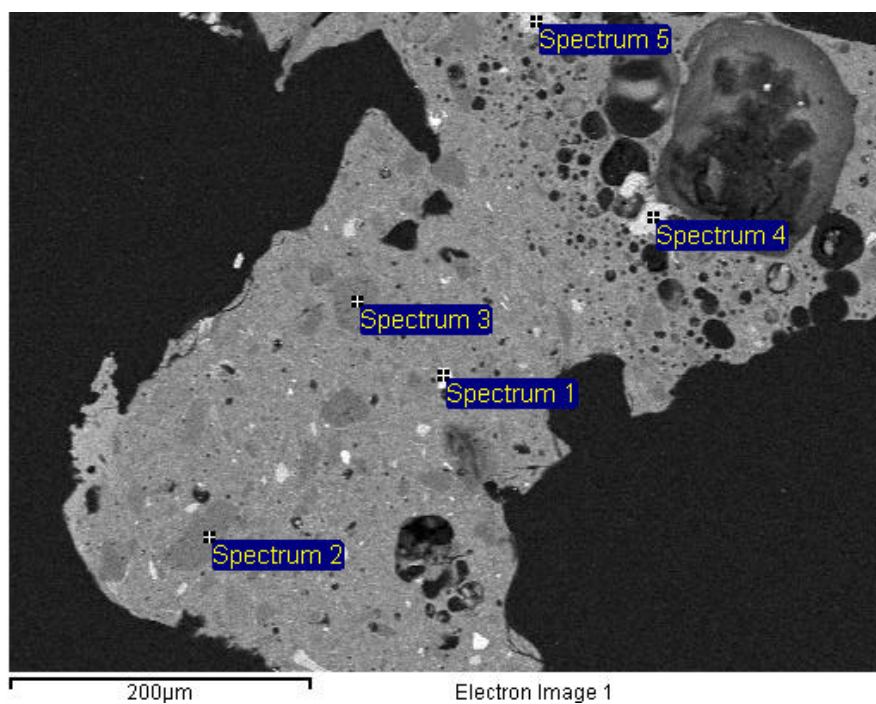
Kuva 4: Näyte 3 ( 5 % / 0,6 %).

Taulukko 4: Kuvassa 4 osoitettujen pisteiden alkuainekoostumus.

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Zn	Total	
1	Yes	5.84			1.78	2.97			89.42		100.00	Magnetiitti
2	Yes	27.88				15.81			53.30	3.01	100.00	Fayalite
3	Yes	29.16				14.61			53.14	3.09	100.00	Fayalite
4	Yes	50.71	1.98	2.59	9.53	24.78	3.07	1.38	5.97		100.00	Lasi
5	Yes	27.31			6.73	14.05			51.91		100.00	Fayalite
6	Yes	42.28	1.53	2.03	10.35	28.62	4.29	1.45	9.46		100.00	Lasi
7	Yes	42.97	1.55	2.07	10.21	30.43	4.13		8.64		100.00	Lasi
8	Yes	41.74	2.13	1.66	10.15	30.51	4.25	1.36	8.19		100.00	Lasi
Max.		50.71	2.13	2.59	10.35	30.51	4.29	1.45	89.42	3.09		
Min.		5.84	1.53	1.66	1.78	2.97	3.07	1.36	5.97	3.01		

All results in weight%



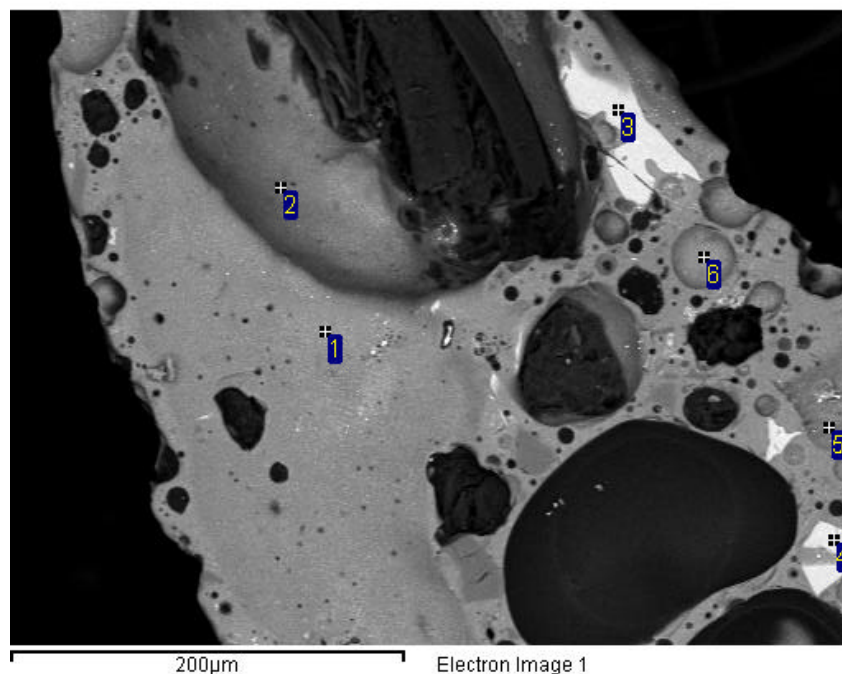
Kuva 5: Näyte 5 (5 % / 0,3 %).

Taulukko 5: Kuvassa 5 osoitettujen pisteiden alkuainekoostumus.

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	O	Na	Al	Si	Ca	Fe	Zn	Total	
Spectrum 1	Yes	28.68311		3.624951			59.74424	7.947702	100	Magnetite
Spectrum 2	Yes	43.40618	5.824548	12.95894	33.56489	4.245435			100	Plagioclase
Spectrum 3	Yes	44.92912	6.331615	12.50019	32.4924	3.746672			100	Plagioclase
Spectrum 4	Yes	34.46264			18.1946		47.34277		100	Fayalite
Spectrum 5	Yes	34.86763			20.20086		44.93151		100	Faylaite
Max.		44.92912	6.331615	12.95894	33.56489	4.245435	59.74424	7.947702		
Min.		28.68311	5.824548	3.624951	18.1946	3.746672	44.93151	7.947702		

All results in weight%



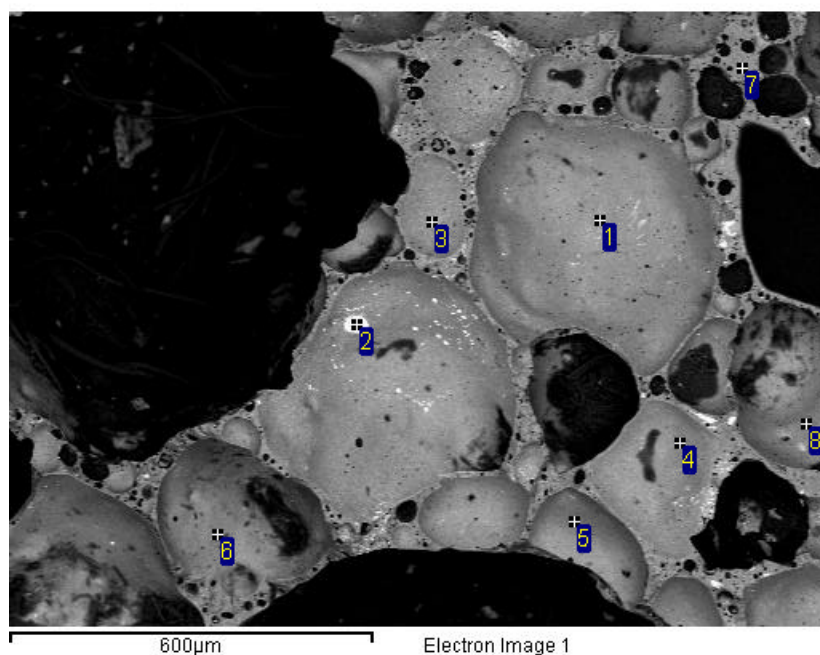
Kuva 6: Näyte 5 (8 % / 0,7 %).

Taulukko 6: Kuvassa 6 osoitettujen pisteiden alkuainekoostumus.

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Cu	Zn	Total	
1	Yes	44.67	1.67	2.10	10.45	25.48		3.14	1.78	0.66	10.05			100.00	Lasi
2	Yes	38.33			7.28	14.92		2.55			36.92			100.00	Lasi
3	Yes	31.72		1.15		15.47					48.71		2.96	100.00	Fayalite
4	Yes	31.24		0.77		15.13					49.43		3.44	100.00	Fayalite
5	Yes	33.80		1.90	9.89	18.35	0.95	2.05	0.96	0.80	29.38	1.92		100.00	Lasi
6	Yes	12.20			5.44	18.33		6.34			57.69			100.00	Lasi
Max.		44.67	1.67	2.10	10.45	25.48	0.95	6.34	1.78	0.80	57.69	1.92	3.44		
Min.		12.20	1.67	0.77	5.44	14.92	0.95	2.05	0.96	0.66	10.05	1.92	2.96		

All results in weight%



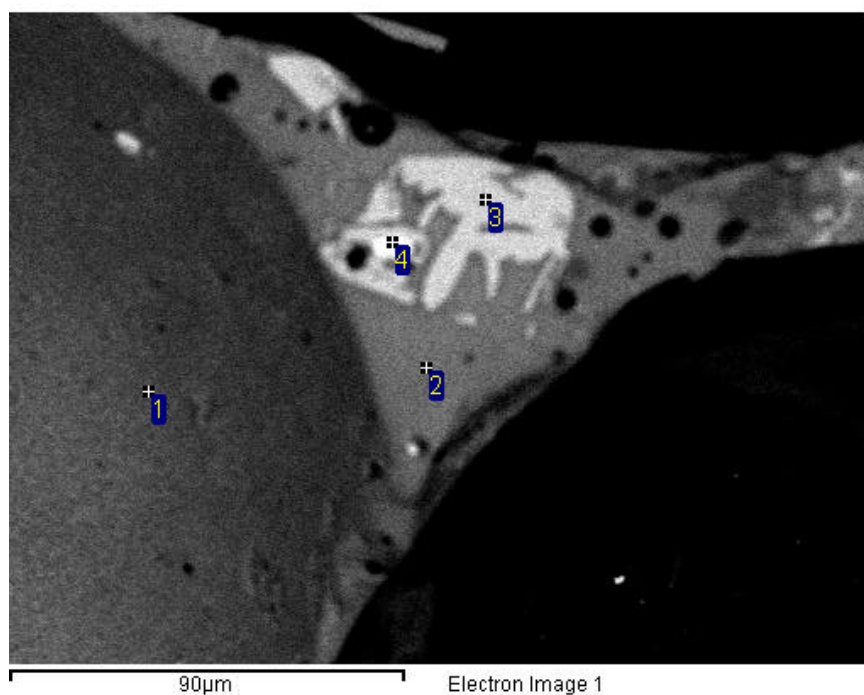
Kuva 7: Näyte 5 (8 % / 0,7 %).

Taulukko 7: Kuvassa 7 osoitettujen pisteiden alkuainekoostumus.

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Ni	Cu	As	Total	
1	Yes	47.19	1.53	1.62	10.30	24.98	2.25	1.32		10.81				100.00	Lasi
2	Yes	2.55			1.32	1.60				36.12	53.91	3.81	0.69	100.00	NiFe (Cu,As)
3	Yes	44.04	1.22	2.54	11.62	25.54	3.52	1.61	0.68	9.23				100.00	Lasi
4	Yes	51.84	1.78	2.68	9.73	23.17	2.50	1.10		7.21				100.00	Lasi
5	Yes	22.98		2.52	8.43	22.22	5.79	2.94		35.12				100.00	Lasi
6	Yes	34.98			7.80	17.71				39.51				100.00	Fayalite
7	Yes	47.63	1.54	3.06	11.15	24.31	2.58	0.94	0.63	8.17				100.00	Lasi
8	Yes	51.43	1.94	1.84	8.84	26.60	2.27	1.53		5.56				100.00	Lasi
Max.		51.84	1.94	3.06	11.62	26.60	5.79	2.94	0.68	39.51	53.91	3.81	0.69		
Min.		2.55	1.22	1.62	1.32	1.60	2.25	0.94	0.63	5.56	53.91	3.81	0.69		

All results in weight%



Kuva 8: Näyte 6 (8 % / 0,3 %).

Taulukko 8: Kuvassa 8 osoitettujen pisteiden alkuainekoostumus.

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Cu	Total	
1	Yes	48.95045	2.072687	3.195756	10.44283	22.0557		2.31672	0.8843505	10.08151		99.99999	Lasi
2	Yes	43.76992		1.615238	7.682632	25.86981		3.093794	1.809737	16.15886		100	Lasi
3	Yes	30.07717				15.078				54.84483		100	Fayalite
4	Yes	13.69387				3.126706	20.66614			30.93962	31.57367	100	Kuparikii su
Max.		48.95045	2.072687	3.195756	10.44283	25.86981	20.66614	3.093794	1.809737	54.84483	31.57367		
Min.		13.69387	2.072687	1.615238	7.682632	3.126706	20.66614	2.31672	0.8843505	10.08151	31.57367		

All results in weight%

Taulukko 1: Kaksivaiheisen ravistelutestin tietoja.

	L/S	Kosteus %	Näyte määrä g	Näyte kuiva g	Lisätty vesi mL	Suodos pH	Suodos johtokyky μS/cm	Suodos T °C	Suodos tilavuus mL	HUOMAUTUKSIA
0% / 0.7%	2	0,1	100,3	100,2	200	10,6	274	23,9	170	Suodatusaika 45s
	8				802	9,9	140	22,2	754	Suodatusaika 3min 32s
3% / 0.5%	2	0,1	100,1	100,0	200	10,3	288	20,3	175	Suodatusaika 1min 58s
	8				800	9,5	97	22,4	770	Suodatusaika 5min 2s
5% / 0.6%	2	0,1	100,5	100,4	201	10,5	287	23,9	160	Suodatusaika 1min 30s
	8				803	9,8	106	22,2	766	Suodatusaika 7min 27s
5% / 0.3%	2	0,09	101,5	101,4	203	9,8	220	20,2	165	Suodatusaika 4min 30s
	8				811	9,5	98	22,5	790	Suodatusaika 5min 15s
8% / 0.7%	2	0,11	100,6	100,5	201	9,8	255	24,0	180	Suodatusaika 1min 33s
	8				804	9,4	72	22,5	742	Suodatusaika 7min 11s
8% / 0.3%	2	0,1	100,3	100,2	200	9,9	186	20,3	160	Suodatusaika 55s
	8				802	9,3	101	22,4	785	Suodatusaika 2min 50s

Taulukko 2: Koeolosuhteet.

KOEOLOSUHTEET		
Ajolämpötila	24	°C
Reaktorin malli	Lasipullo	
Reaktorin tilav.	500	mL
Reaktorin tilav.	2000	mL
Sekoitt.tyyppi	Heidolph Reax 20 /12	
Kierrokset	10	rpm

Taulukko 3: Koelaitteisto.

LAITTEISTO	
pH-mittari	A27988
Puskuriliuos	7,0 ja 2,0
Johtokyky	A27988
Infrapunakuivain	A23546
Vaaka	A23545

Taulukko 4: Kaksivaiheisen ravistelutestin tulokset

		L/S	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	Hg	Pb	TOC	Cl-	F-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
Mitatut	0-näyte	2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	1,4	<5	<5	20	mg/l
pitoisuudet [mg/l]	0% / 0,7%	8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	5,6	<5	<5	<5	mg/l
Muutetut	A2		<0,20	<0,20	<0,20	<0,10	<0,10	<0,20	<0,40	<0,20	<0,10	<0,20	<0,40	<0,20	<0,40	<0,40	2,80	<10,0	<10,0	39,9	mg/kg
pitoisuudet [mg/kg]	A2-10		<1,00	<1,00	<1,00	<0,50	<0,50	<1,00	<2,00	<1,00	<0,50	<1,00	<2,00	<1,00	<2,00	<2,00	48,9	<50,0	<50,0	<75,5	mg/kg
Mitatut	Näyte 2	2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	<0,1	<0,2	0,2	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	2,1	<5	<5	30	mg/l
pitoisuudet [mg/l]	3% / 0,5%	8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,2	<0,2	<0,1	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	0,7	<5	<5	<10	mg/l
Muutetut	A2		<0,20	<0,20	<0,20	<0,10	<0,10	<0,20	<0,40	0,40	<0,10	<0,20	<0,40	<0,20	<0,40	<0,40	4,20	<10,0	<10,0	60,01	mg/kg
pitoisuudet [mg/kg]	A2-10		<1,00	<1,00	<1,00	<0,50	<0,50	<1,82	<2,00	<1,17	<0,50	<1,00	<2,00	<1,00	<2,00	<2,00	9,45	<50,0	<50,0	<135,0	mg/kg
Mitatut	Näyte 3	2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,4	<0,2	0,6	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	1,8	<5	<5	37	mg/l
pitoisuudet [mg/l]	5% / 0,6%	8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,1	<0,2	<0,1	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	1,7	<5	<5	<10	mg/l
Muutetut	A2		<0,20	<0,20	<0,20	<0,10	<0,10	0,80	<0,40	1,20	<0,10	<0,20	<0,40	<0,20	<0,40	<0,40	3,61	<10,0	<10,0	74,1	mg/kg
pitoisuudet [mg/kg]	A2-10		<1,00	<1,00	<1,00	<0,50	<0,50	1,48	2,00	<1,80	<0,50	<1,00	<2,00	<1,00	<2,00	<2,00	17,2	<50,0	<50,0	<143,1	mg/kg
Mitatut	Näyte 4	2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,1	<0,2	0,2	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	3,1	<5	<5	37	mg/l
pitoisuudet [mg/l]	5% / 0,3%	8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,3	<0,2	<0,1	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	0,8	<5	<5	<10	mg/l
Muutetut	A2		<0,20	<0,20	<0,20	<0,10	<0,10	0,20	<0,40	0,40	<0,10	<0,20	<0,40	<0,20	<0,40	<0,40	6,21	<10,0	<10,0	74,1	mg/kg
pitoisuudet [mg/kg]	A2-10		<1,00	<1,00	<1,00	<0,50	<0,50	2,68	2,00	<1,16	<0,50	<1,00	<2,00	<1,00	<2,00	<2,00	11,7	<50,0	<50,0	<144,0	mg/kg
Mitatut	Näyte 5	2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,7	<0,2	0,9	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	1,5	<5	<10	75	mg/l
pitoisuudet [mg/l]	8% / 0,7%	8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,2	<0,2	<0,1	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	1,3	<5	<5	<5	mg/l
Muutetut	A2		<0,20	<0,20	<0,20	<0,10	<0,10	1,40	<0,40	1,80	<0,10	<0,20	<0,40	<0,20	<0,40	<0,40	3,00	<10,0	<10,0	150,1	mg/kg
pitoisuudet [mg/kg]	A2-10		<1,00	<1,00	<1,00	<0,50	<0,50	2,90	2,00	<2,43	<0,50	<1,00	<2,00	<1,00	<2,00	<2,00	13,4	<50,0	<50,0	<175,4	mg/kg
Mitatut	Näyte 6	2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,2	<0,2	0,3	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	2,1	<5	<5	25	mg/l
pitoisuudet [mg/l]	8% / 0,3%	8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,4	<0,2	<0,1	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	0,8	<5	<5	<10	mg/l
Muutetut	A2		<0,20	<0,20	<0,20	<0,10	<0,10	0,40	<0,40	0,60	<0,10	<0,20	<0,40	<0,20	<0,40	<0,40	4,19	<10,0	<10,0	49,9	mg/kg
pitoisuudet [mg/kg]	A2-10		<1,00	<1,00	<1,00	<0,50	<0,50	3,68	2,00	<1,32	<0,50	<1,00	<2,00	<1,00	<2,00	<2,00	10,1	<50,0	<50,0	<123,9	mg/kg
Raja-arvo, pysyvän jätteen kaatopaikka		0,5			0,4	2	4	0,5	0,1	0,5	0,04		0,06	20	0,01	0,5	500	800	10	1000	mg/kg
Raja-arvo, tavanomaisen jätteen kaatopaikka		10			10	50	50	2	0,5	10	1		0,7	100	0,2	10	800	15000	150	20000	mg/kg
Raja-arvo, ongelmajätteen kaatopaikka		70			40	100	200	25	7	30	5		5	300	2	50	1000	25000	500	50000	mg/kg



Taulukko 1: Läpivirtaustestin esitietoja näytteelle 1.

NÄYTE		
Kolonneihin pakatun näytteen kuivapitoisuus	99,9	%
Kolonneihin pakatun jätteen paino	939,0	g
Kolonneihin pakatun jätteen kuivapaino	938,1	g

Taulukko 2: Läpivirtaustestin mittaustietoja näytteelle 1.

MITTAUSTULOKSET			pH <sub>alku</sub>	pH <sub>loppu</sub>	Johtokyky
Koe lämpötila	24	°C			
Kolonnin kostutusnopeus	49	g/h			
Fraktio 1, nestemäärä	95,91	g	10,068	10,509	31,2 mS/m
Virtausnopeus fraktio 1	45,02	g/h			mS/m
Fraktio 2, nestemäärä	94,03	g	10,519	10,476	24,7 mS/m
Virtausnopeus fraktio 2	45,87	g/h			mS/m
Fraktio 3, nestemäärä	281,09	g	10,290	10,197	17,94 mS/m
Virtausnopeus fraktio 3	46,46	g/h			mS/m
Fraktio 4, nestemäärä	472,17	g	10,085	10,262	23,0 mS/m
Virtausnopeus fraktio 4	47,22	g/h			mS/m
Fraktio 5, nestemäärä	942,3	g	10,250	9,985	13,13 mS/m
Virtausnopeus fraktio 5	47,12	g/h			mS/m
Fraktio 6, nestemäärä	2822,5	g	9,640	9,830	9,83 mS/m
Virtausnopeus fraktio 6	46,89	g/h			mS/m
Fraktio 7, nestemäärä	4690,6	g	9,326	8,417	7,41 mS/m
Virtausnopeus fraktio 7	47,8	g/h			mS/m

Taulukko 3: Läpivirtaustestin eri fraktioiden L/S-suhteet sekä kumulatiivinen L/S-suhde.

TOTEUTUNEET L/S-SUHTEET	
Näytefraktio 1, toteutunut L/S suhde	0,10
Näytefraktio 1, toteutunut kumulatiivinen L/S suhde	0,10
Näytefraktio 2, toteutunut L/S suhde	0,10
Näytefraktio 2, toteutunut kumulatiivinen L/S suhde	0,20
Näytefraktio 3, toteutunut L/S suhde	0,30
Näytefraktio 3, toteutunut kumulatiivinen L/S suhde	0,50
Näytefraktio 4, toteutunut L/S suhde	0,50
Näytefraktio 4, toteutunut kumulatiivinen L/S suhde	1,01
Näytefraktio 5, toteutunut L/S suhde	1,0
Näytefraktio 5, toteutunut kumulatiivinen L/S suhde	2,0
Näytefraktio 6, toteutunut L/S suhde	3,0
Näytefraktio 6, toteutunut kumulatiivinen L/S suhde	5,0
Näytefraktio 7, toteutunut L/S suhde	5,0
Näytefraktio 7, toteutunut kumulatiivinen L/S suhde	10,0

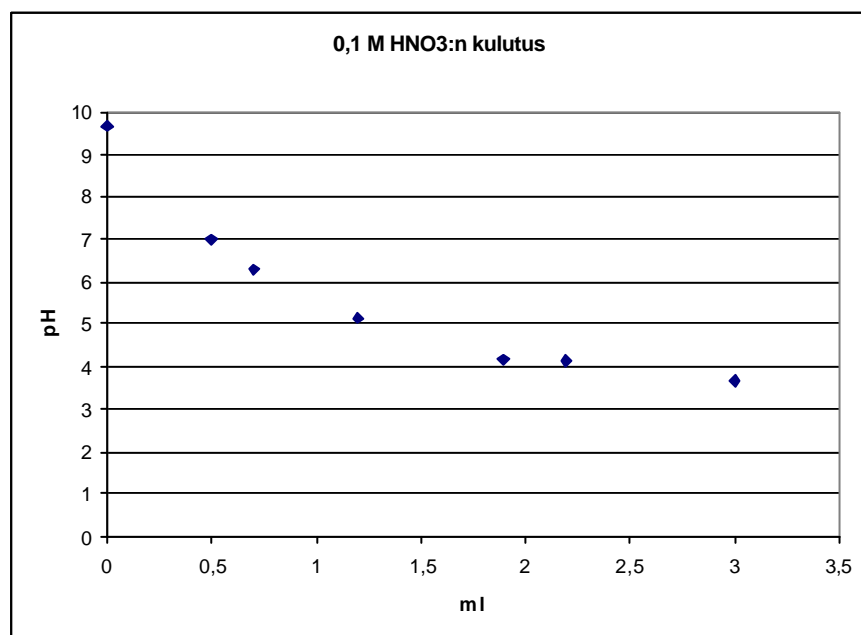


Taulukko 4: Läpivirtaustestissä tutkittujen aineiden mitatut (mg/l) ja lasketut (mg/kg) pitoisuudet eri aineille eri fraktioissa, laskettu kumulatiivinen pitoisuus ja kaatopaikkojen raja-arvot

		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	Hg	Pb	TOC
Fraktio 1 L/S 0,1	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,26	0,1	0,49	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	4
	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	max	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,027	0,010	0,050	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,410
Fraktio 2 L/S 0,1	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,32	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	3
	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	max	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,010	0,032	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,302
Fraktio 3 L/S 0,3	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,24	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	3
	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	max	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,060	0,030	0,072	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,901
Fraktio 4 L/W 0,5	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	2
	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	max	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,101	0,050	0,101	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	1,009
Fraktio 5 L/S 1	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	2
	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	max	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,201	0,101	0,201	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	0,101	2,014
Fraktio 6 L/S 3	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	2
	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	max	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,603	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	6,034
Fraktio 7 L/S 5	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	max	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	5,1
	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	max	0,501	0,501	0,501	0,501	0,501	1,003	1,003	0,501	0,501	1,003	1,003	0,501	1,003	1,003	25,571
Yhteensä L/S 10	min	0	0	0	0	0	0,630	0	0,255	0	0	0	0	0	0	
	max	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	2,015	1,506	1,260	1,005	1,506	1,506	1,005	1,506	1,506	36,242
RAJA-ARVO, PYSYVÄ JÄTE		0,5		0,4	2	4	0,5	0,1	0,5	0,04		0,06	20	0,01	0,5	500
RAJA-ARVO, TAVANOMAINEN		10		10	50	50	2	0,5	10	1		0,7	100	0,2	10	800
RAJA-ARVO, ONGELMA JÄTE		70		40	100	200	25	7	30	5		5	300	2	50	1000

Taulukko 1: Hapon kulutus esitestissä näytteellä 5.

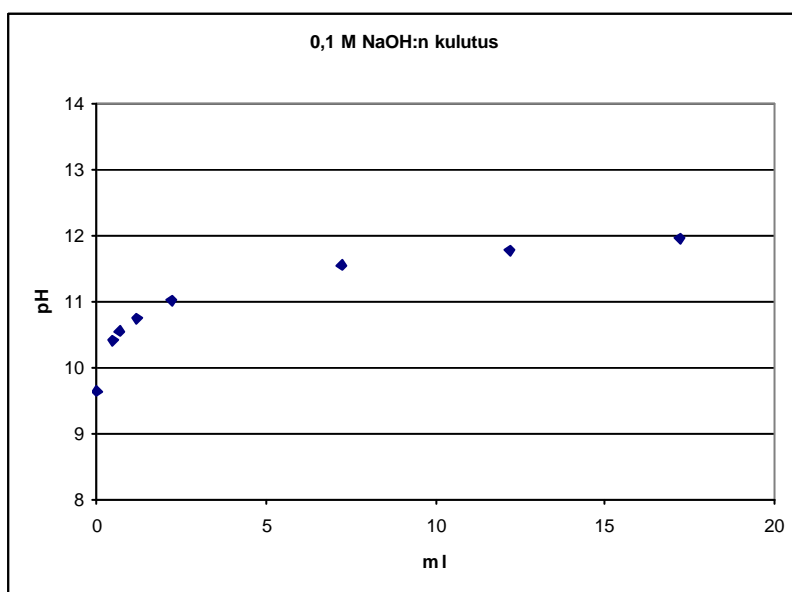
PVM	Klo	Aika min	L/S suhde	Kosteus %	Kuiva- paino g	Märkä- paino g	Lisätty vesi mL			pH
<b>LUONNOLLINEN pH</b>										
29.6.08	14:40	0	9	0,09	14,9534	14,9669	134,57			
	15:40	60								
	15:50	70								9,67
			L/S suhde	Kosteus %	Kuiva- paino g	Märkä- paino g	Lisätty vesi mL	HNO3 mL	Yhteensä HNO3 mL	pH
<b>HAPPOTITRAUS</b>										
29.6.08	15:52	0	9	0,09	14,9534	14,9669	134,57	0,5		
	16:22	30							0,5	7,00
	16:23	0						0,2		
	16:53	30							0,7	6,29
	16:54	0						0,5		
	17:24	30							1,2	5,14
	17:27	0						0,7		
	17:57	30							1,9	4,16
	17:59	0						0,3		
	18:29	30							2,2	4,13
	18:30	0						0,8		
	19:00	30							3	3,68



Kuvaaja 1: Hapon kulutus esitestissä näytteellä 5.

Taulukko 2: Emäksen kulutus esitestissä näytteellä 5.

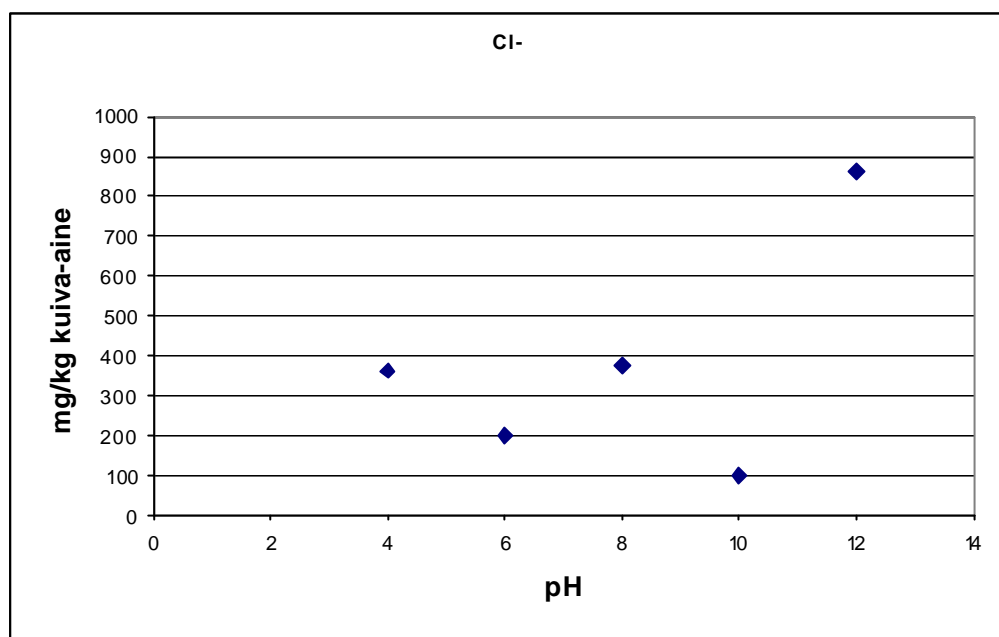
PVM	Klo	Aika min	L/S suhde	Kosteus %	Kuiva- paino g	Märkä- paino g	Lisätty vesi mL			pH
<b>LUONNOLLINEN pH</b>										
29.6.08	14:41	0	9	0,09	14,9601	14,9736	134,63			
	15:41	60								
	15:51	70								9,65
			L/S suhde	Kosteus %	Kuiva- paino g	Märkä- paino g	Lisätty vesi mL	NaOH mL	Yhteensä NaOH mL	pH
<b>EMÄSTITRAUS</b>										
29.6.08	15:53	0	9	0,09	14,9601	14,9736	134,63	0,5		
	16:23	30							0,5	10,41
	16:24	0						0,2		
	16:54	30							0,7	10,54
	16:55	0						0,5		
	17:25	30							1,2	10,75
	17:28	0						1		
	17:58	30							2,2	11:02
	18:00	0						5		
	18:30	30							7,2	11:56
	18:31	0						5		
	19:01	30							12,2	11,79
	19:02	0						5		
	19:32	30							17,2	11,97



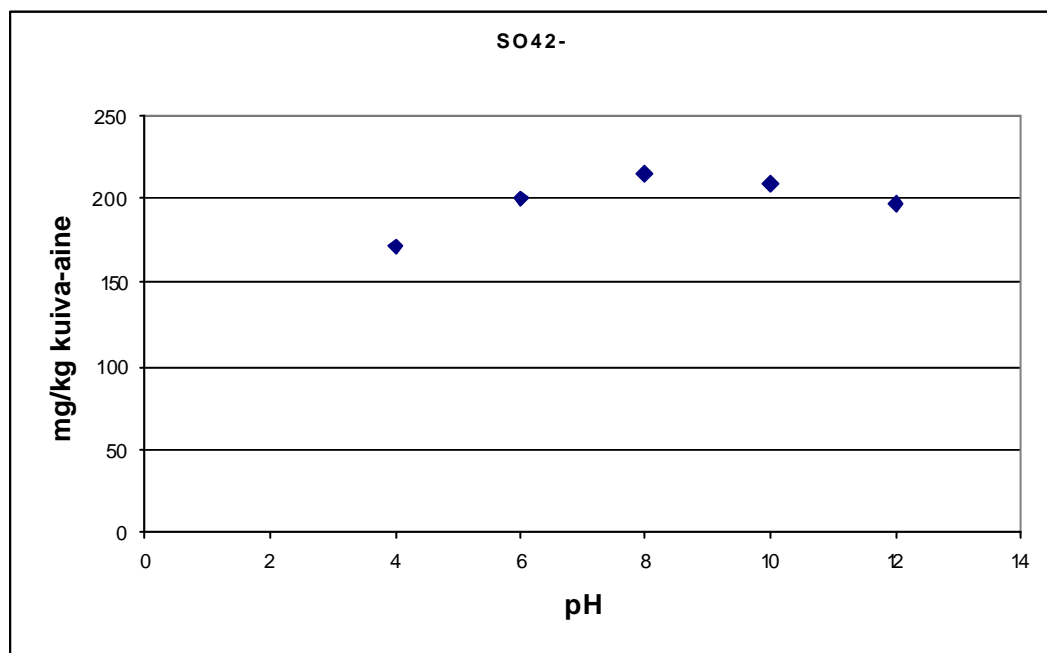
Kuvaaja 2: Emäksen kulutus esitestissä näytteellä 5.

Taulukko 3: pH-staattisen testin tulokset näytteellä 5

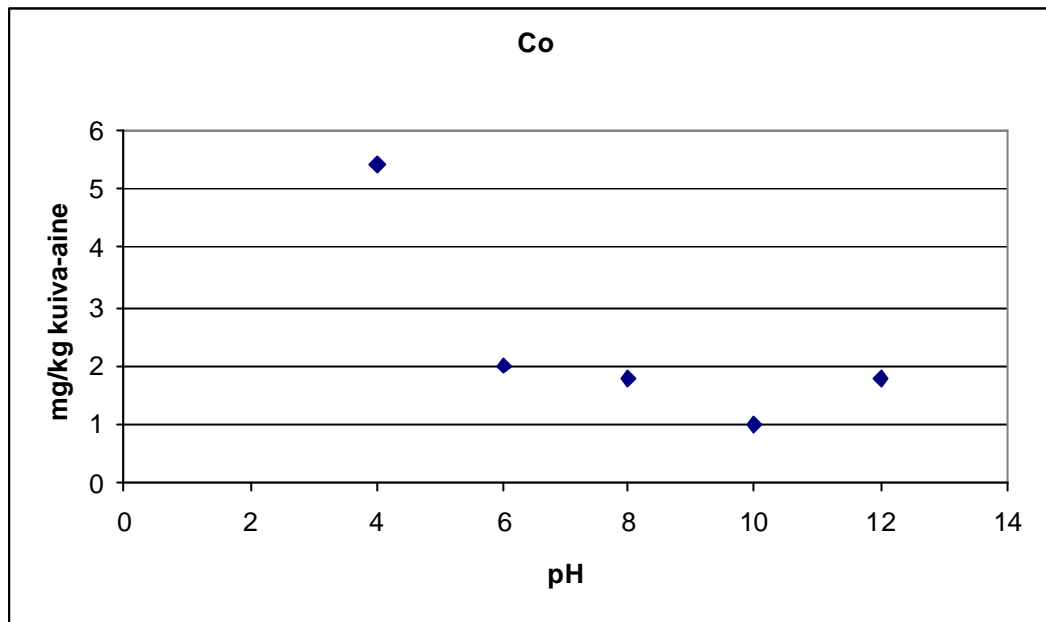
	L/S		Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	Hg	Pb	Cl-	F-	SO42-
pH 4	9	mg/l	<0,1	0,6	0,4	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,2	40	<5	19
		mg/kg	<0,9	5,4	3,6	1,8	<0,9	<0,9	<0,9	<0,9	<0,9	<0,9	<0,9	<0,9	<0,9	<1,8	360	<45	171
pH 6	10	mg/l	<0,2	<0,2	<1	<0,2	0,3	<0,2	<0,2	<0,5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,5	<0,5	<0,5	20	<5	20
		mg/kg	<2	<2	<10	<2	3	<2	<2	<5	<2	<2	<2	<5	<5	<5	200	<50	200
pH 8	9	mg/l	<0,2	<0,2	<1	<0,2	<0,3	<2	<0,2	<1	<0,2	<0,2	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	42	<5	24
		mg/kg	<1,8	<1,8	<9	<1,8	<2,7	<18	<1,8	<9	<1,8	<1,8	<4,5	<4,5	<4,5	<4,5	378	<45	216
pH 10	10	mg/l	<0,1	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	0,41	<0,2	0,34	<0,05	<0,1	<0,2	<0,1	<0,2	<0,2	10	<5	21
LUONNOLLINEN		mg/kg	<1	<1	<1	<0,5	<0,5	4,1	<2	3,4	<0,5	<1	<2	<1	<2	<2	100	<50	210
pH 12	9	mg/l	<0,2	<0,2	<1	<0,2	<0,3	<2	<0,2	<1	<0,2	<0,2	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	96	<5	22
		mg/kg	<1,8	<1,8	<9	<1,8	<2,7	<18	<1,8	<9	<1,8	<1,8	<4,5	<4,5	<4,5	<4,5	864	<45	198



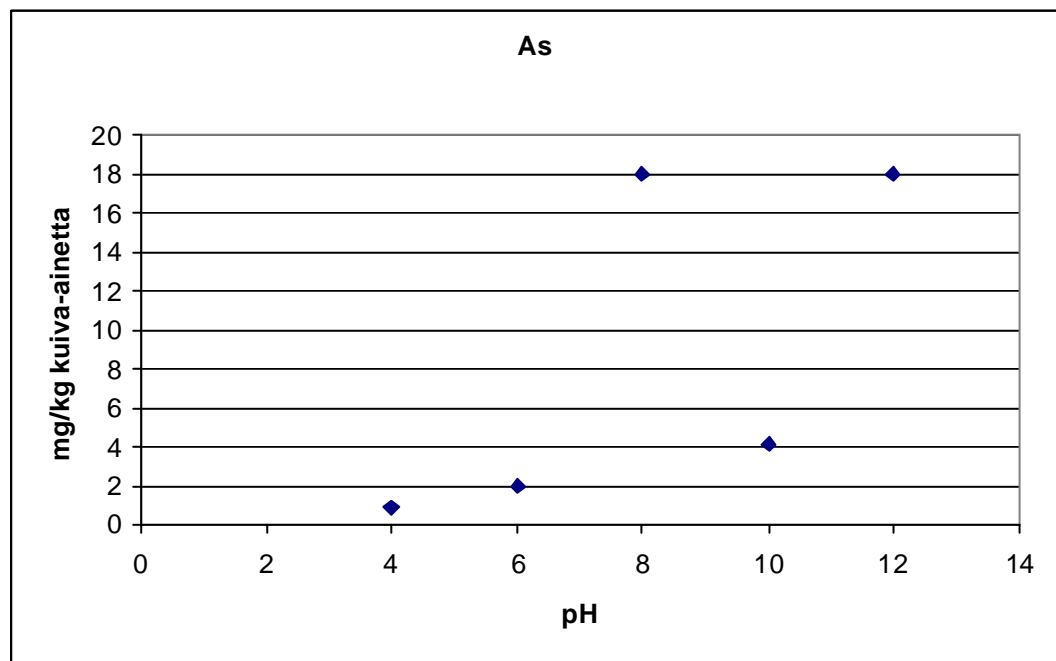
Kuva 3: Kloridi-yhdisteiden liukeneminen eri pH-arvoilla näytteellä 5.



Kuva 4: Sulfidi-yhdisteiden liukeneminen eri pH-arvoilla näytteellä 5.



Kuva 5: Koboltin liukeneminen eri pH-arvoilla näytteellä 5.



Kuva 6: Arseenin liukeneminen eri pH-arvoilla näytteellä 5.